



**Ana Soledade dos Reis Silva**

Licenciatura em Ciências de Engenharia do Ambiente

**Utilização de Método Geofísico como  
Ferramenta Inovadora para Incrementar  
a Produção de Biogás e Respetivo  
Aproveitamento Energético. Caso de  
Estudo: Aterro do Barlavento - Célula B**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia do Ambiente - Perfil Engenharia Sanitária

Orientador: Professor Auxiliar Convidado e Mestre João  
Artur Cabeças, Faculdade de Ciências e Tecnologia da  
Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Maria da Graça Madeira Martinho  
Arguente: Mestre José Macário Correia  
Vogal(ais): Mestre Artur João Lopes Cabeças



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2014





**Ana Soledade dos Reis Silva**

Licenciatura em Ciências de Engenharia do Ambiente

**Utilização de Método Geofísico como  
Ferramenta Inovadora para Incrementar  
a Produção de Biogás e Respetivo  
Aproveitamento Energético. Caso de  
Estudo: Aterro do Barlavento - Célula B**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia do Ambiente - Perfil Engenharia Sanitária

Orientador: Professor Auxiliar Convidado e Mestre João  
Artur Cabeças, Faculdade de Ciências e Tecnologia da  
Universidade Nova de Lisboa



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA  
Setembro 2014



**Utilização de Método Geofísico como Ferramenta Inovadora para Incrementar a Produção de Biogás e Respetivo Aproveitamento Energético. Caso de Estudo: Aterro do Barlavento - Célula B**

© Copyright em nome de Ana Soledade Silva, da FCT/UNL e da UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



Para a minha querida Avó





## AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar ao meu orientador, ao Professor Artur João Cabeças pela dedicação, pelos esclarecimentos e pela disponibilidade para me ajudar e orientar.

À equipa da ALGAR que tão bem me recebeu e ajudou nas visitas ao Aterro Sanitário do Barlavento, nas boleias, nos esclarecimentos e na informação disponibilizada.

Aos elementos do Laboratório Nacional de Engenharia Civil pelos esclarecimentos e pela orientação, em especial ao Doutor Rogério Mota.

À minha mãe e ao meu pai que são os meus pilares e a quem eu dedico todo este percurso, porque sem eles não teria sido possível. Obrigada pelo amor incondicional e por tudo o que fazem por mim. Desculpem as fases menos boas. Amo-vos incondicionalmente.

Ao meu Padrinho e à Ti Lita, que mesmo em tempos difíceis me receberam e ajudaram para que conseguisse realizar as idas ao Aterro. Além de tudo, por serem mais que família e amigos, por estarem sempre lá.

À minha avó, a quem muito devo e que sempre foi fonte de força e inspiração. Obrigada pelas conversas, pelos almoços e pelo amor infinito.

À minha irmã e para a minha irmã, porque faz sempre tudo por mim e eu nem sempre agradeço e porque a amo eternamente. Obrigada mana.

À minha tita e à minha Maria porque estão sempre lá para mim. Obrigada meus amores.

Ao meu namorado, Micael, que foi um companheiro de luta durante todo este percurso, que me apoiou e deu força em todos os momentos. Obrigada pelo amor e dedicação.

À minha Jô, que me é tudo. Gosto muito de ti.

À minha Andreiazinha, que mesmo longe está sempre por perto.

Aos meus doces, Vera e Guida, que foram as melhores companheiras que podia ter encontrado na FCT. Obrigada por tornarem este percurso inesquecível... Obrigada por tudo.

A toda a minha família e amigos que me apoiaram e acreditaram sempre que seria capaz. Ao Telmo, à Cristina, ao José Joaquim, à Bazoca, ao Janet, às Princesas do Pequeno, aos GASP, ao Alex.

Ao meu Pépé.



## RESUMO

Um aterro sanitário, como instalação de eliminação final de resíduos, tem como principal objetivo não causar impacto no ambiente envolvente, nomeadamente ao nível das emissões gasosas e líquidas produzidas pela decomposição dos resíduos.

Como tal, é exigido pela legislação a existência de um sistema de proteção ambiental que contemple a impermeabilização da massa de resíduos, do biogás, das águas lixiviantes e das águas pluviais bem como a sua adequada drenagem e captação.

A problemática deste estudo está diretamente relacionada com a produção de biogás (efluente gasoso) e tem como principal objetivo incrementar a sua produção para queima e/ou aproveitamento energético, compreendendo respetivamente os seus benefícios ambientais e económicos.

Com o objetivo de perceber o que estaria a condicionar a produção de biogás na célula C do aterro sanitário do Barlavento, recorreu-se a aplicação inovadora do método geofísico designado por “Ensaio geofísico de resistividade elétrica”. Esta aplicação inovadora teve como principal objetivo conhecer as condições relativas ao teor de humidade existente no interior da massa de resíduos em estudo.

Através dos resultados obtidos, que sugeriam que a massa de resíduos estaria saturada com lixiviado, realizaram-se várias campanhas, com o intuito de confirmar a veracidade dos resultados obtidos com os ensaios geofísicos e de aplicar ensaios teste que pudessem ser pontos de partida para avaliar o grau de incerteza observado.

O ensaio de resistividade elétrica teve sucesso na sua aplicabilidade prática, tendo no entanto sido condicionado pela análise dos resultados obtidos uma vez que, ao desconhecerem-se as condições existentes nos resíduos depositados, considerou-se que as baixos valores de resistividade elétrica ( $<5 \text{ ohm.m}$ ) corresponderiam à presença de lixiviado no interior do aterro do Barlavento, o que acabou por ser parcialmente confirmado com as perfurações realizadas nas campanhas realizadas pelo elevado grau de humidade que se observou. Era contudo expectável que se verificasse maior presença de lixiviado na massa de resíduos retirada nas perfurações.

Estas campanhas forneceram contudo informações importantes sobre o ponto de vista das condições e da situação física existente no aterro sanitário, alguns pontos fracos e outros fortes, que permitiram avançar noutros trabalhos de pesquisa para apoio à problemática em estudo, nomeadamente, a melhoria da cobertura da massa de resíduos e a melhor forma de localizar os drenos de biogás.

Palavras-chave: Aterro Sanitário; Ensaio geofísico; Resistividade elétrica; Humidade; Biogás; Energia



# ABSTRACT

A landfill, as an installation of disposal of waste, aims not to cause impact on the surrounding environment, particularly in terms of gaseous and liquid emissions produced by waste decomposition.

Therefore, it is required by law the existence of a system of environmental protection that includes waterproofing of the waste, biogas, leachate and rainwater as well as its adequate drainage and catchment.

This study is directly related to the production of biogas (waste gas) and aims to increase its production to burning and / or energy production, comprising respectively the environmental and economic benefits.

With the objective to understand what was constraining the production of biogas in the cell C of Barlavento's landfill, an innovative application of geophysical method entitled "The resistivity method" was used. This application aimed to better understand the requirements related to the moisture present in the waste mass under study.

Using the obtained results, which suggested that the mass of waste was saturated with leachate, several campaigns were performed in order to confirm the accuracy and veracity of the results obtained using the geophysical testing and applying test trials that could be considered as starting points for assessing the uncertainty observed.

The resistivity method was successful in their practical applicability, although it has been conditioned by the analysis of the results since there was a lack of information related to the existing conditions of the waste deposited. So, it was considered that the low values of electrical resistivity ( $<5 \text{ ohm.m}$ ) corresponded to the presence of leachate in the landfill, which turned out to be partially confirmed by the high level of moist observed in the drilling campaigns carried out. However, it was expected to have a higher presence of leachate in the samples of waste mass.

Nevertheless, these campaigns have provided important information about the point of view of the conditions and the physical situation in the landfill, both strong and weak points, which allowed to progress in other research works to support the issue under study, namely, by improving the coverage of the mass of waste and how to best locate the drains of biogas.

Keywords: Landfill; Geophysics Method; Electrical Resistivity; Moisture; Biogas; Energy



# ÍNDICE DE MATÉRIAS

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Enquadramento e justificação do estudo .....	1
1.2. Objetivos da dissertação .....	2
1.3. Estrutura da dissertação .....	2
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	4
2.1. Enquadramento da situação em Portugal da Produção de Resíduos Urbanos .....	4
2.2. Política Nacional e Legislação .....	6
2.3. Parâmetros e Características dos Resíduos.....	7
2.4. Aterro Sanitário.....	7
2.4.1. Sistemas de proteção ambiental .....	8
2.4.2. Águas lixiviantes .....	11
2.4.3. Biogás.....	15
2.4.4. Métodos de Exploração do Aterro.....	20
2.4.5. Sistema de encerramento .....	20
2.4.6. Sistemas de monitorização .....	21
2.5. Métodos geofísicos - Ensaio .....	24
2.5.1. Método de resistividade elétrica.....	25
2.5.2. Aplicação do Método de Resistividade Elétrica. Estudos Realizados .....	28
3. CASO DE ESTUDO - ATERRO DO BARLAVENTO .....	29
3.1. ALGAR e Aterro Sanitário do Barlavento .....	29
3.2. Situação do aterro e descrição da problemática em estudo .....	32
3.2.1. Produção de biogás.....	33
3.2.2. Produção de energia elétrica no aterro sanitário do Barlavento .....	35
3.2.3. Comparação da produção de energia elétrica com outros aterros com tipologia semelhante.....	38
3.2.4. Emissões .....	40
3.2.5. Influência da localização geográfica .....	42
3.3. Aplicação inovadora do ensaio geofísico de resistividade elétrica ao caso de estudo .....	43
3.4. Descrição do processo - Metodologia aplicada no Ensaio de Resistividade Elétrica .....	44
4. RESULTADOS - ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	50
4.1. Alinhamento PRE1 .....	50
4.2. Alinhamento PRE2 .....	52
4.3. Alinhamento PRE3 .....	54
4.4. Alinhamento PRE4 .....	56
5. DISCUSSÃO - ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	58
6. CAMPANHAS REALIZADAS .....	60
6.1. Primeira Campanha.....	60
6.1.1. Célula B .....	60

6.1.2. Célula C .....	67
6.2. Segunda Campanha .....	71
6.2.1. Célula B .....	71
6.2.2. Célula C .....	75
6.3. Terceira Campanha.....	80
6.3.1. Célula B .....	80
6.3.2. Célula C .....	84
6.4. Quarta Campanha .....	88
6.4.1. Célula B .....	88
6.4.2. Célula C .....	93
6.5. Quinta Campanha .....	99
6.5.1. Célula B .....	99
6.5.2. Célula C .....	102
7. DISCUSSÃO - CAMPANHAS REALIZADAS .....	107
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	111
8.1. Síntese .....	111
8.2. Limitações .....	112
8.3. Desenvolvimentos Futuros.....	112
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	114





# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Evolução entre 2000 e 2012 da quantidade de RSU recolhida em Portugal e o destino final (Fonte: INE).....	4
Figura 2.2 - Evolução entre 2000 e 2012 da capitação de RSU em Portugal. (Fonte: INE) .....	5
Figura 2.3 - Esquema do Sistema de Impermeabilização da Zona Basal do Aterro Sanitário.....	9
Figura 2.4 - Composição do biogás ao longo das fases de degradação (Fonte: Levy e Cabeças, 2006) .....	16
Figura 2.5 - Dispositivo básico tetraeletródico .....	25
Figura 2.6 - Dispositivo de Wenner, adaptado de Dam, 2012 .....	26
Figura 2.7 - Dispositivo de dipolo-dipolo, adaptado de Lago, 2009.....	27
Figura 3.1 - Municípios do Sistema Multimunicipal do Algarve. Fonte: Relatório Ambiental Anual do Aterro Sanitário do Barlavento Algarvio - 2012 (2013) .....	29
Figura 3.2 - Modelo técnico do subsistema do aterro sanitário do Barlavento .....	30
Figura 3.3 - Esquema do processo de aproveitamento do biogás produzido (Fonte: <a href="http://www.algar.com.pt/pt/">http://www.algar.com.pt/pt/</a> ).....	31
Figura 3.4 - Unidade de refrigeração e secagem (à frente) e Unidade de limpeza de biogás por carvão ativado (atrás) (foto tirada a 18/02/2014 por Ana Silva) .....	32
Figura 3.5 - Valores médios percentuais de monitorização do biogás: metano, dióxido de carbono e oxigénio (Fonte: RAA ASB 2009, 2010, 2011 e 2012) .....	35
Figura 3.6 - Estimativa do volume de biogás produzido (Modelo LandGEM) .....	36
Figura 3.7 - Gráfico da energia elétrica potencial produzida (MWh) VS energia elétrica real produzida injetada na rede (MWh) .....	38
Figura 3.8 - Emissões de CO <sub>2</sub> equivalente e emissões de CO <sub>2</sub> evitadas por destruição nos motores.....	42
Figura 3.9 - Emissões evitadas por injeção de energia na rede elétrica .....	42
Figura 3.10 - Equipamento de injeção da corrente elétrica e de leitura dos dados obtidos (ABEM - TERRAMETER SAS 4000).....	44
Figura 3.11 - Localização dos alinhamentos para aplicação do método de resistividade elétrica .....	46
Figura 3.12 - Trabalhos no alinhamento PRE1 (foto tirada em 18/02/2014 por Ana Silva).....	46
Figura 3.13 - Trabalhos no alinhamento PRE3 (foto tirada em 18/02/2014 por Ana Silva).....	47
Figura 3.14 - Trabalhos no alinhamento PRE2 (foto tirada em 19/02/2014 por Ana Silva).....	47

Figura 3.15 - Trabalhos no alinhamento PRE4 (foto tirada em 19/02/2014 por Ana Silva).....	48
Figura 3.16 - Metodologia seguida para cada alinhamento na realização do ensaio de resistividade elétrica.....	49
Figura 3.17 - Ligação dos elétrodos (Foto tirada em 18/02/2014).....	49
Figura 3.18 - Elétrodos (Foto tirada em 18/02/2014 por Ana Silva) .....	49
Figura 4.1 - Alinhamento PRE1. A - Do topo para a base, pseudo-secção das resistividades aparentes medidas no campo, pseudo-secção das resistividades aparentes calculadas e o modelo de resistividade elétrica para o dispositivo dipolo-dipolo, sem considerar a topografia. B - Modelo de Resistividade Elétrica para o dispositivo dipolo-dipolo, considerando a topografia. ....	50
Figura 4.2 - Alinhamento PRE1. A - Do topo para a base, pseudo-secção das resistividades aparentes medidas no campo, pseudo-secção das resistividades aparentes calculadas e o modelo de resistividade elétrica para o dispositivo Wenner, sem considerar a topografia. B - Modelo de Resistividade Elétrica para o dispositivo Wenner, considerando a topografia. ....	51
Figura 4.3 - Alinhamento PRE2. A - Do topo para a base, pseudo-secção das resistividades aparentes medidas no campo, pseudo-secção das resistividades aparentes calculadas e o modelo de resistividade elétrica para o dispositivo dipolo-dipolo, sem considerar a topografia. B - Modelo de Resistividade Elétrica para o dispositivo dipolo-dipolo, considerando a topografia. ....	52
Figura 4.4 - Alinhamento PRE2. A - Do topo para a base, pseudo-secção das resistividades aparentes medidas no campo, pseudo-secção das resistividades aparentes calculadas e o modelo de resistividade elétrica para o dispositivo Wenner, sem considerar a topografia. B - Modelo de Resistividade Elétrica para o dispositivo Wenner, considerando a topografia. ....	53
Figura 4.5 - Alinhamento PRE3. A - Do topo para a base, pseudo-secção das resistividades aparentes medidas no campo, pseudo-secção das resistividades aparentes calculadas e o modelo de resistividade elétrica para o dispositivo dipolo-dipolo, sem considerar a topografia. B - Modelo de Resistividade Elétrica para o dispositivo dipolo-dipolo, considerando a topografia. ....	54
Figura 4.6 - Alinhamento PRE3. A - Do topo para a base, pseudo-secção das resistividades aparentes medidas no campo, pseudo-secção das resistividades aparentes calculadas e o modelo de resistividade elétrica para o dispositivo Wenner, sem considerar a topografia. B - Modelo de Resistividade Elétrica para o dispositivo Wenner, considerando a topografia. ....	55
Figura 4.7 - Alinhamento PRE3. A - Do topo para a base, pseudo-secção das resistividades aparentes medidas no campo, pseudo-secção das resistividades aparentes calculadas e o modelo de resistividade elétrica para o dispositivo dipolo-dipolo, sem considerar a topografia. B - Modelo de Resistividade Elétrica para o dispositivo dipolo-dipolo, considerando a topografia. ....	56

Figura 4.8 - Alinhamento PRE4. A - Do topo para a base, pseudo-seção das resistividades aparentes medidas no campo, pseudo-seção das resistividades aparentes calculadas e o modelo de resistividade elétrica para o dispositivo Wenner, sem considerar a topografia. B - Modelo de Resistividade Elétrica para o dispositivo Wenner, considerando a topografia. ....	57
Figura 6.1 Marcação dos pontos de perfuração no alinhamento PRE2. A- Modelo de Resistividade Elétrica para o dispositivo dipolo-dipolo B- Modelo de Resistividade Elétrica para o dispositivo de Wenner .....	60
Figura 6.2 - Identificação dos novos poços de biogás (P1, P2 e P3) .....	61
Figura 6.3 - Equipamento utilizado (Trado de 600) (Foto tirada em 29/05/2014 por Ana Silva) 62	
Figura 6.4 - Perfuração P1 (Foto tirada em 30/05/2014 pelo Eng.º Valter Ferreira) .....	62
Figura 6.5 - Perfuração P2 (Foto tirada em 29/05/2014 por Ana Silva).....	63
Figura 6.6 - Perfuração P3 (Foto tirada em 30/05/2014 pelo Eng.º Valter Ferreira) .....	63
Figura 6.7 - Colocação de brita nas perfurações (Foto tirada em 30/05/2014 pelo Eng.º Valter Ferreira) .....	64
Figura 6.8 - Dreno de biogás (Foto tirada em 25/05/2014 por Ana Silva) .....	64
Figura 6.9 - Medições do biogás na 1ª campanha no poço P1. A- Percentagem de metano (CH <sub>4</sub> ). B- Percentagem de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ). C- Percentagem de oxigénio (O <sub>2</sub> ). D- Percentagem de outros gases .....	66
Figura 6.10 - Medições do biogás na 1ª campanha no poço P2. A- Percentagem de metano (CH <sub>4</sub> ). B- Percentagem de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ). C- Percentagem de oxigénio (O <sub>2</sub> ). D- Percentagem de outros gases .....	66
Figura 6.11 - Medições do biogás na 1ª campanha no poço P3. A- Percentagem de metano (CH <sub>4</sub> ). B- Percentagem de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ). C- Percentagem de oxigénio (O <sub>2</sub> ). D- Percentagem de outros gases .....	67
Figura 6.12 - Identificação das zonas das valas e dos poços de biogás monitorizados .....	68
Figura 6.13 - Medições do biogás na 1ª campanha no poço P8. A- Percentagem de metano (CH <sub>4</sub> ). B- Percentagem de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ). C- Percentagem de oxigénio (O <sub>2</sub> ). D- Percentagem de outros gases .....	69
Figura 6.14 - Medições do biogás na 1ª campanha no poço P10. A- Percentagem de metano (CH <sub>4</sub> ). B- Percentagem de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ). C- Percentagem de oxigénio (O <sub>2</sub> ). D- Percentagem de outros gases .....	70
Figura 6.15 - Medições do biogás na 1ª campanha no poço P11. A- Percentagem de metano (CH <sub>4</sub> ). B- Percentagem de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ). C- Percentagem de oxigénio (O <sub>2</sub> ). D- Percentagem de outros gases .....	70

Figura 6.16 - Medições do biogás na 2ª campanha no poço P1. A- Percentagem de metano (CH <sub>4</sub> ). B- Percentagem de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ). C- Percentagem de oxigénio (O <sub>2</sub> ). D- Percentagem de outros gases .....	72
Figura 6.17 - Medições do biogás na 2ª campanha no poço P2. A- Percentagem de metano (CH <sub>4</sub> ). B- Percentagem de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ). C- Percentagem de oxigénio (O <sub>2</sub> ). D- Percentagem de outros gases .....	73
Figura 6.18 - Medições do biogás na 2ª campanha no poço P3. A- Percentagem de metano (CH <sub>4</sub> ). B- Percentagem de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ). C- Percentagem de oxigénio (O <sub>2</sub> ). D- Percentagem de outros gases .....	73
Figura 6.19 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P1 nos dias 16/07/2014 e 17/07/2014 .....	74
Figura 6.20 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P2 nos dias 16/07/2014 e 17/07/2014 .....	74
Figura 6.21 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P3 nos dias 16/07/2014 e 17/07/2014 .....	74
Figura 6.22 - Vala executada junto ao dreno P10 (Foto tirada por Ana Silva a 16/07/2014) .....	75
Figura 6.23 - Valas executadas em volta dos drenos P8, P10 e P11 (Foto tirada por Ana Silva a 17/07/2014) .....	75
Figura 6.24- Medições do biogás na 2ª campanha no poço P8. A- Percentagem de metano (CH <sub>4</sub> ). B- Percentagem de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ). C- Percentagem de oxigénio (O <sub>2</sub> ). D- Percentagem de outros gases .....	77
Figura 6.25 - Medições do biogás na 2ª campanha no poço P10. A- Percentagem de metano (CH <sub>4</sub> ). B- Percentagem de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ). C- Percentagem de oxigénio (O <sub>2</sub> ). D- Percentagem de outros gases .....	77
Figura 6.26 - Medições do biogás na 2ª campanha no poço P11. A- Percentagem de metano (CH <sub>4</sub> ). B- Percentagem de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ). C- Percentagem de oxigénio (O <sub>2</sub> ). D- Percentagem de outros gases .....	78
Figura 6.27 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P8 nos dias 16/07/2014 e 17/07/2014 .....	79
Figura 6.28 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P10 nos dias 16/07/2014 e 17/07/2014 .....	79
Figura 6.29 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P11 nos dias 16/07/2014 e 17/07/2014 .....	79

Figura 6.30 - Medições do biogás na 3ª campanha no poço P1. A- Percentagem de metano (CH <sub>4</sub> ). B- Percentagem de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ). C- Percentagem de oxigénio (O <sub>2</sub> ). D- Percentagem de outros gases .....	81
Figura 6.31 - Medições do biogás na 3ª campanha no poço P3. A- Percentagem de metano (CH <sub>4</sub> ). B- Percentagem de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ). C- Percentagem de oxigénio (O <sub>2</sub> ). D- Percentagem de outros gases .....	82
Figura 6.32 - Medições do biogás na 3ª campanha no poço P2. A- Percentagem de metano (CH <sub>4</sub> ). B- Percentagem de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ). C- Percentagem de oxigénio (O <sub>2</sub> ). D- Percentagem de outros gases .....	82
Figura 6.33 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P1 nos dias 29/07/2014 e 30/07/2014 .....	83
Figura 6.34 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P2 nos dias 29/07/2014 e 30/07/2014 .....	83
Figura 6.35 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P3 nos dias 29/07/2014 e 30/07/2014 .....	84
Figura 6.36 - Recarregamento com água lixiviante da vala em volta do poço P11 (Foto tirada por Ana Silva a 30/07/2014).....	84
Figura 6.37 - Medições do biogás na 3ª campanha no poço P8. A- Percentagem de metano (CH <sub>4</sub> ). B- Percentagem de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ). C- Percentagem de oxigénio (O <sub>2</sub> ). D- Percentagem de outros gases .....	86
Figura 6.38 - Medições do biogás na 3ª campanha no poço P10. A- Percentagem de metano (CH <sub>4</sub> ). B- Percentagem de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ). C- Percentagem de oxigénio (O <sub>2</sub> ). D- Percentagem de outros gases .....	86
Figura 6.39 - Medições do biogás na 3ª campanha no poço P11. A- Percentagem de metano (CH <sub>4</sub> ). B- Percentagem de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ). C- Percentagem de oxigénio (O <sub>2</sub> ). D- Percentagem de outros gases .....	87
Figura 6.40 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P8 nos dias 29/07/2014 e 30/07/2014 .....	87
Figura 6.41 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P10 nos dias 29/07/2014 e 30/07/2014 .....	88
Figura 6.42 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P11 nos dias 29/07/2014 e 30/07/2014 .....	88
Figura 6.43 - Vala executada em volta do poço P1 (Foto tirada a 26/08/2014 por Ana Silva)...	89
Figura 6.44 - Vala poço P1 carregada com lixiviado (Foto tirada a 27/08/2014 por Ana Silva) .	89

Figura 6.45 - Medições do biogás na 4ª campanha no poço P1. A- Percentagem de metano (CH <sub>4</sub> ). B- Percentagem de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ). C- Percentagem de oxigénio (O <sub>2</sub> ). D- Percentagem de outros gases .....	91
Figura 6.46 - Medições do biogás na 4ª campanha no poço P2. A- Percentagem de metano (CH <sub>4</sub> ). B- Percentagem de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ). C- Percentagem de oxigénio (O <sub>2</sub> ). D- Percentagem de outros gases .....	91
Figura 6.47 - Medições do biogás na 4ª campanha no poço P3. A- Percentagem de metano (CH <sub>4</sub> ). B- Percentagem de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ). C- Percentagem de oxigénio (O <sub>2</sub> ). D- Percentagem de outros gases .....	92
Figura 6.48 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P1 nos dias 26/08/2014 e 27/08/2014 .....	92
Figura 6.49 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P2 nos dias 26/08/2014 e 27/08/2014 .....	93
Figura 6.50 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P3 nos dias 26/08/2014 e 27/08/2014 .....	93
Figura 6.51 - Poço P11 (Foto tirada a 13/08/2014).....	94
Figura 6.52 - Vala Poço P11 cheia com brita (Foto tirada a 13/08/2014).....	94
Figura 6.53 - Vala poço P11 tapada com geomembrana (Foto tirada a 13/08/2014) .....	94
Figura 6.54 - Medições do biogás na 4ª campanha no poço P10. A- Percentagem de metano (CH <sub>4</sub> ). B- Percentagem de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ). C- Percentagem de oxigénio (O <sub>2</sub> ). D- Percentagem de outros gases .....	96
Figura 6.55 - Medições do biogás na 4ª campanha no poço P8. A- Percentagem de metano (CH <sub>4</sub> ). B- Percentagem de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ). C- Percentagem de oxigénio (O <sub>2</sub> ). D- Percentagem de outros gases .....	96
Figura 6.56 - Medições do biogás na 4ª campanha no poço P11. A- Percentagem de metano (CH <sub>4</sub> ). B- Percentagem de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ). C- Percentagem de oxigénio (O <sub>2</sub> ). D- Percentagem de outros gases .....	97
Figura 6.57 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P8 nos dias 26/08/2014 e 27/08/2014 .....	98
Figura 6.58 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P11 nos dias 26/08/2014 e 27/08/2014 .....	98
Figura 6.59 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P10 nos dias 26/08/2014 e 27/08/2014 .....	98

Figura 6.60 - Medições do biogás na 5ª campanha no poço P1. A- Percentagem de metano (CH <sub>4</sub> ). B- Percentagem de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ). C- Percentagem de oxigénio (O <sub>2</sub> ). D- Percentagem de outros gases .....	100
Figura 6.61 - Medições do biogás na 5ª campanha no poço P2. A- Percentagem de metano (CH <sub>4</sub> ). B- Percentagem de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ). C- Percentagem de oxigénio (O <sub>2</sub> ). D- Percentagem de outros gases .....	100
Figura 6.62 - Medições do biogás na 5ª campanha no poço P3. A- Percentagem de metano (CH <sub>4</sub> ). B- Percentagem de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ). C- Percentagem de oxigénio (O <sub>2</sub> ). D- Percentagem de outros gases .....	101
Figura 6.63 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P1 nos dias 16/09/2014 e 17/09/2014 .....	102
Figura 6.64 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P2 nos dias 16/09/2014 e 17/09/2014 .....	102
Figura 6.65 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P3 nos dias 16/09/2014 e 17/09/2014 .....	102
Figura 6.66 - Medições do biogás na 5ª campanha no poço P8. A- Percentagem de metano (CH <sub>4</sub> ). B- Percentagem de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ). C- Percentagem de oxigénio (O <sub>2</sub> ). D- Percentagem de outros gases .....	104
Figura 6.67 - Medições do biogás na 5ª campanha no poço P10. A- Percentagem de metano (CH <sub>4</sub> ). B- Percentagem de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ). C- Percentagem de oxigénio (O <sub>2</sub> ). D- Percentagem de outros gases .....	104
Figura 6.68 - Medições do biogás na 5ª campanha no poço P11. A- Percentagem de metano (CH <sub>4</sub> ). B- Percentagem de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ). C- Percentagem de oxigénio (O <sub>2</sub> ). D- Percentagem de outros gases .....	105
Figura 6.69 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P8 nos dias 16/09/2014 e 17/09/2014 .....	106
Figura 6.70 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P10 nos dias 16/09/2014 e 17/09/2014 .....	106
Figura 6.71 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P11 nos dias 16/09/2014 e 17/09/2014 .....	106



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Comparação do lixividade produzido em aterros com exploração recente e prologongada (Fonte: Tchobanoglous <i>et al</i> , 1993) .....	12
Tabela 2.2 - Processos de tratamento unitário de águas lixiviantes (Adaptado de Levy e Cabeças, 2006) .....	13
Tabela 2.3 - Constituintes do biogás (Adaptado de Tchobanoglous et al, 1993) .....	15
Tabela 2.4 - Controlo de lixiviados (Fonte: Decreto-lei n.183/2009, de 10 de Agosto) .....	22
Tabela 2.5 - Controlo de águas subterrâneas (Fonte: Decreto-lei n.183/2009, de 10 de Agosto) .....	23
Tabela 3.1 - População residente, área a densidade populacional de cada concelho em 1998 e 2012.....	29
Tabela 3.2 - Valores de monitorização do biogás: metano, dióxido de carbono e oxigénio (Fonte: RAA ASB 2009, 2010, 2011 e 2012) .....	34
Tabela 3.3 - Dados para aplicação do modelo LandGEM .....	35
Tabela 3.4- Cálculos efetuados para determinar o PCI do biogás .....	36
Tabela 3.5 - Fórmula aplicadas no cálculo do potencial de energia potencial (Adaptado de Silva, 2014).....	37
Tabela 3.6 - Valores de k e L0 utilizados para correr o modelo LandGEM (Fonte: Cabeças, 2011) .....	38
Tabela 3.7 - Comparação entre o aterro sanitário da Algar (Barlavento), da Amarsul (Seixal) e Suldouro dos quantitativos de RU depositados, da estimativa de produção de energia e da energia exportada .....	39
Tabela 3.8 - Estimativa da emissão de CO <sub>2</sub> equivalente pela emissão de biogás para a atmosfera.....	40
Tabela 3.9 - Distância dipolar e extensão de cada alinhamento .....	48
Tabela 6.1 - Profundidades atingidas nas perfurações no alinhamento PRE2 .....	61
Tabela 6.2 - Medições de biogás nos três novos drenos P1, P2 e P3 (03/06/2014 e 26/06/2014) .....	65
Tabela 6.3 - Resultados de 1ª campanha das medições do nível piezométrico e do biogás nos poços P8, P10 e P11 (03/06/2014 e 27/06/2014) .....	68
Tabela 6.4 - Resultados da 2ª campanha das medições de biogás nos drenos P1, P2 e P3 (16/07/2014 e 17/07/2014) .....	71

Tabela 6.5 - Resultados da 2ª campanha das medições de biogás nos drenos P8, P10 e P11 (16/07/2014 e 17/07/2014) .....	76
Tabela 6.6 - Resultados da 3ª campanha das medições de biogás nos drenos P1, P2 e P3 (29/07/2014 e 30/07/2014) .....	80
Tabela 6.7 - Resultados da 3ª campanha das medições de biogás nos drenos P8, P10 e P11 (29/07/2014 e 30/07/2014) .....	85
Tabela 6.8 - Resultados da 4ª campanha das medições de biogás nos drenos P1, P2 e P3 (26/08/2014 e 27/08/2014) .....	89
Tabela 6.9 - Resultados da 4ª campanha das medições de biogás nos drenos P8, P10 e P11 (26/08/2014 e 27/08/2014) .....	94
Tabela 6.10 - Resultados da 5ª campanha das medições de biogás nos drenos P1, P2 e P3 (16/09/2014 e 17/09/2014) .....	99
Tabela 6.11 - Resultados da 5ª campanha das medições de biogás nos drenos P8, P10 e P11 (16/09/2014 e 17/09/2014) .....	103



## ABREVIATURAS

ARH	Administração de Região Hidrográfica
CBO <sub>5</sub>	Carência Bioquímica de Oxigênio ao quinto dia
COT	Carbono Orgânico Total
CQO	Carência Química de Oxigênio
CT	Carbono Total
DL	Decreto-lei
GEE	Gases de Efeito de Estufa
GPR	Ground-penetrating radar
INE	Instituto Nacional de Estatística
LandGEM	Landfill Gas Emissions Model
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PERSU	Plano Estratégico de Resíduos Sólidos Urbanos
PRE	Perfil de Resistividade Elétrica
RAA ASB	Relatório Ambiental Anual do Aterro Sanitário do Barlavento
RMS	Root Mean Squared
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
USEPA	United States Environmental Protection Agency
UEB	Unidade de Valorização Energética de Biogás
VLE	Valores Limite de Emissão

## SÍMBOLOS

$Q_{CH_4}$	Produção de metano anual no ano de cálculo (m <sup>3</sup> /ano) (m <sup>3</sup> .ano <sup>-1</sup> )
CH <sub>4</sub>	Metano
CO	Monóxido de Carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
H <sub>2</sub> O	Água
H <sub>2</sub> S	Ácido Sulfídrico
$i$	Incremento do tempo
$I$	Intensidade da corrente elétrica injetada no terreno
$j$	Incremento do tempo
$K$	Fator geométrico
$k$	Taxa de geração de metano
$k$	Coeficiente de Permeabilidade
kW	Quilowatt
$L_0$	Capacidade potencial de geração de metano (m <sup>3</sup> .Mg <sup>-1</sup> )
m	metro
$M_i$	Massa de resíduos depositados no ano $i$ (Mg)
MW	Megawatt
$n$	Diferença entre o ano do cálculo e o ano inicial de deposição de resíduos
N <sub>2</sub>	Azoto
NH <sub>3</sub>	Amoníaco
Ni	Níquel
O <sub>2</sub>	Oxigénio
°C	Graus Centígrados
Ohm.m	Omega por metro
Pb	Chumbo
$t_{ij}$	Ano da secção $j^{\text{th}}$ da massa de resíduos $M_i$ aceite no ano $i^{\text{th}}$ (ano)
tonCO <sub>2</sub> eq	Toneladas de dióxido de carbono equivalente
Zn	Zinco
$\Delta V$	Diferença de potencial eléctrico entre os pontos $P_x$ e $P_y$



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento e justificação do estudo

Ao longo dos anos a deposição de resíduos tem sido alvo de preocupação crescente, com o objetivo de diminuir o impacto na saúde e no ambiente. Em Portugal Continental estima-se que em 1995 existiam mais de 300 lixeiras a céu aberto, possuindo cada município uma ou mais (Levy & Cabeças, 2006).

Este cenário alterou-se com a aprovação do PERSU em 1997, com linhas estratégicas que visavam o encerramento de todas as lixeiras. Em 2002 todas as lixeiras já tinham sido encerradas e já existiam 37 aterros que cumpriam os requisitos definidos na Diretiva Aterros (Diretiva n.º 1999/31/CE, do Conselho, de 26 de Abril).

No Decreto-Lei n.º 183/2009, que transpõe a Diretiva Aterros, um dos sistemas de proteção ambiental exigidos refere-se ao sistema de captação, drenagem e queima de biogás. O biogás após captado pode ser valorizado energeticamente, cumprindo-se desta forma os requisitos exigidos no decreto-lei.

A monitorização através de medições da concentração do gás, expressa em percentagem, é extremamente importante, uma vez que desta forma é possível controlar e valorizar o biogás (Manual de Instruções de Trabalho da Unidade de Valorização Energética do Biogás Produzido no Aterro Sanitário do Barlavento).

Atualmente, no caso de estudo do aterro sanitário do Barlavento, os resultados obtidos através das medições efetuadas, revelam que a qualidade do biogás não corresponde à esperada e que existe uma diminuição na produção do biogás, estimando-se que o seu rendimento desceu de cerca de 90% para 50%.

Com a unidade de queima instalada, com um PIP (Ponto de Injeção Prévia na rede) de capacidade de 1,7 MW e, cerca de 100 poços ativos na célula B, o estudo e a análise deste problema é alvo de elevada importância. Não só pelos benefícios existentes relativos à valorização energética, mas também porque o conhecimento das razões que estão na origem do problema que procurámos avaliar, podem apoiar na tomada de decisões relativamente às medidas a implementar.

Desta forma, considerou-se fundamental conhecer as condições existentes no interior da massa de resíduos e para tal, recorreu-se à aplicação inovadora do método geofísico por ensaio de resistividade elétrica.

Este ensaio permitiu detetar as condições de humidade da célula B, tendo os resultados obtidos sido analisados e discutidos de forma a permitirem retirar algumas conclusões de modo a apoiarem a tomada de medidas para a resolução da problemática em estudo.

## **1.2. Objetivos da dissertação**

O objetivo deste trabalho consiste na utilização do método geofísico (método geotécnico) aplicado no universo da massa de resíduos no estudo de um aterro de resíduos, sendo uma aplicação inovadora para identificar a possibilidade da sua utilização. Com efeito pretende-se conseguir; a) estabelecer uma correlação de causa-efeito na célula B do aterro em estudo, b) com base nos resultados e análise das correlações possíveis de retirar, realizar (numa zona a definir no aterro) trabalho de campo de soluções que possam justificar a reinjeção de lixiviado nos drenos de biogás, bombear os sedimentos acumulados nestes drenos de biogás, aumentar a humidade a diferentes níveis dos estratos de resíduos, etc, e c) analisar posteriormente a sua eficácia, tendo por base a avaliação retirada pelo método geofísico com discussão das respetivas conclusões.

## **1.3. Estrutura da dissertação**

A presente dissertação encontra-se organizada em oito capítulos:

### **1. Introdução**

Neste capítulo é feita uma pequena introdução à problemática em estudo.

### **2. Revisão da literatura**

Este capítulo incide sobre os fundamentos teóricos relacionados com a temática em estudo, nomeadamente, nos fundamentos relacionados com as instalações de deposição de resíduos, os aterros sanitários, e o ensaio utilizado como ferramenta inovadora, o ensaio geofísico de resistividade elétrica.

### **3. Caso de Estudo - Aterro Sanitário do Barlavento**

Este capítulo introduz toda a informação e conceitos relacionados com o caso de estudo, nomeadamente, descrição e características do aterro sanitário do Barlavento e descrição da metodologia aplicada no ensaio de resistividade elétrica à célula B.

### **4. Resultados - Ensaio de Resistividade Elétrica**

Apresentação dos resultados obtidos no ensaio de resistividade elétrica aplicado à célula B.

### **5. Discussão - Ensaio de Resistividade Elétrica**

Discussão dos resultados obtidos no ensaio de resistividade elétrica aplicado à célula B.

### **6. Campanhas Realizadas**

Descrição dos trabalhos práticos realizados em cada campanha, assim como o objetivo de cada campanha e os resultados obtidos.

### **7. Discussão - Campanha Realizadas**



Discussão dos resultados obtidos na realização de cada campanha, tendo em conta a aplicação inovadora do método geofísico de resistividade elétrica e o principal objetivo do trabalho realizado.

#### 8. Considerações Finais

Neste capítulo destacam-se as principais conclusões do estudo realizado, assim como as limitações detetadas ao longo do mesmo e as sugestões para estudos e desenvolvimentos futuros.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. Enquadramento da situação em Portugal da Produção de Resíduos Urbanos

Em Portugal, com o encerramento das lixeiras iniciou-se uma nova fase na abordagem do conceito do “lixo” e no reaproveitamento e reciclagem das suas componentes. O 'lixo' passou a ser designado por 'resíduos', passando a ser um recurso suscetível de ser valorizado e integrado numa cadeia económica e não apenas um resíduo a ser encaminhado para destino final (Levy e Cabeças, 2006).

De acordo com o decreto-lei n.º73/2011, resíduos são "quaisquer substâncias ou objetos de que o detentor se desfaz ou tem a intenção ou a obrigação de se desfazer". Segundo o mesmo decreto-lei a classificação de resíduo urbano considera o "resíduo proveniente de habitações bem como outro resíduo que, pela sua natureza ou composição, seja semelhante ao resíduo proveniente de habitações".

Em Portugal durante um longo período de tempo verificou-se a tendência para o aumento da quantidade de resíduos sólidos urbanos (RSU) recolhidos, contudo esta tendência tem vindo a alterar-se. Na Figura 2.1, observando-se o gráfico, esta alteração tornou-se perceptível a partir do ano de 2010 devido ao declínio na quantidade de resíduos recolhidos por ano.

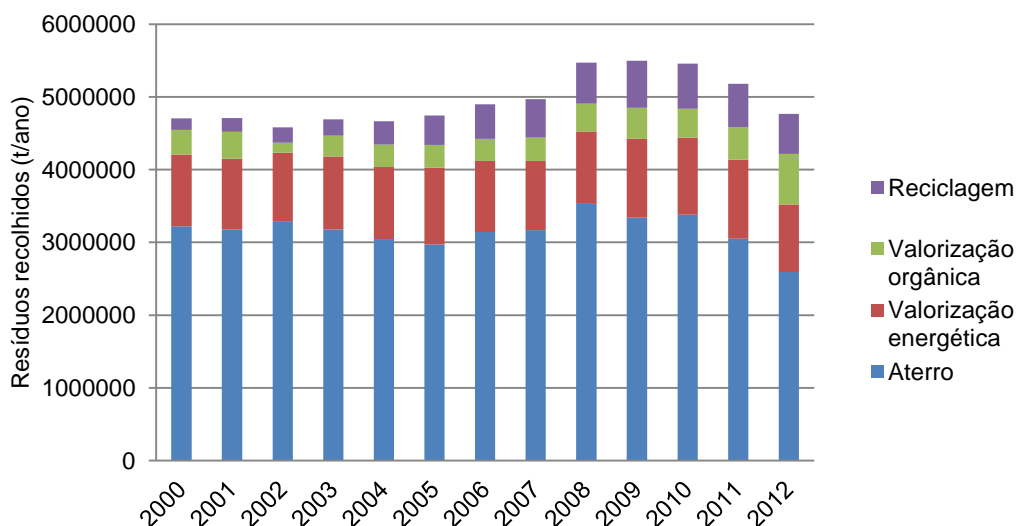


Figura 2.1 - Evolução entre 2000 e 2012 da quantidade de RSU recolhida em Portugal e o destino final (Fonte: INE)

Através do gráfico da Figura 2.1, também se verifica uma diminuição da quantidade de resíduos sólidos urbanos que foram depositados em aterro e um aumento da quantidade de RSU valorizada organicamente.

Em relação à quantidade de RSU valorizada seletivamente depois do aumento até ao ano de 2009 mantem-se, aproximadamente, constante. Relativamente à valorização energética, ao longo de período de tempo entre 2000 e 2012, não se verificaram alterações significativas, apesar de ter sofrido um ligeiro decréscimo no ano de 2012.

No ano de 2012 considerou-se que 54,4% dos resíduos sólidos urbanos recolhidos foram encaminhados para aterro, 19,5% foram valorizados energeticamente, cerca de 14,6% foram valorizados organicamente e aproximadamente 11,5% foram reciclados.

A produção de resíduos representa a quantidade de resíduos sólidos que é produzida numa região num intervalo de tempo e pode ser expressa em unidade de volume, ou de peso, por unidade de tempo.

Conhecida a produção de resíduos pode-se determinar a respetiva capitação da região, ou seja, a quantidade média de resíduos produzidos por habitante, normalmente expressa em unidade de peso por habitante e por unidade de tempo (e.g. Kg.hab<sup>-1</sup>.dia<sup>-1</sup>) (Levy e Cabeças, 2006; Martinho *et al*, 2011).

No gráfico da Figura 2.2, apresentam-se os valores das capitações anuais de resíduos sólidos urbanos entre 2000 e 2012.

Verificaram-se algumas oscilações nos valores da capitação ao longo do período de tempo considerado, nomeadamente, a ocorrência de um pico em 2002, um aumento entre os anos de 2004 e 2010 e um declínio após esse período.

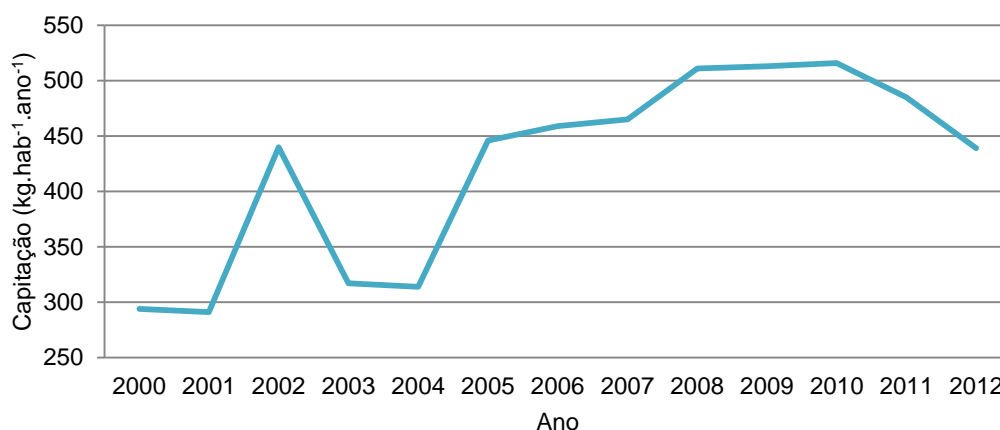


Figura 2.2 - Evolução entre 2000 e 2012 da capitação de RSU em Portugal. (Fonte: INE)

Vários fatores podem estar na origem da variação da quantidade de RSU produzida num determinado local ao longo do tempo, nomeadamente, o nível e o modo de vida da população, a dimensão do agregado familiar, o tipo e a dimensão da habitação, a localização geográfica, a estação do ano, a estrutura urbana e as atividades económicas (Martinho *et al*, 2011).

## 2.2. Política Nacional e Legislação

Quanto à política nacional, em 1996 foi elaborado o "Plano Estratégico de Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU)", cujo objetivo assenta no estabelecimento de bases orientadoras de uma política de gestão de RSU que responda às necessidades do país. Para além de apresentar um levantamento da situação de Portugal aquando da sua elaboração, também apresenta linhas de ação bem definidas. O PERSU II, para o horizonte 2007-2016, consiste na revisão e atualização do PERSU I.

À data, já existe proposta para o PERSU 2020, motivada pelas alterações ocorridas na organização de sector dos resíduos, pelas novas metas comunitárias de reciclagem para o ano 2020, pela recalendarização das metas de desvio de resíduos urbanos biodegradáveis (RUB) e pelo novo quadro financeiro plurianual da União Europeia para 2014-2020 (Proposta PERSU 2020).

Relativamente aos aterros sanitários, o PERSU II considera que estas instalações se devem destinar a resíduos últimos, ou seja, resíduos que já não podem ser tratados nem valorizados (Levy e Cabeças, 2006).

Ao longo do tempo a legislação passa por modificações de forma a dar resposta às novas necessidades da sociedade e a promover a melhoria contínua do sistema de gestão de resíduos. A legislação existente regulamenta os aspetos referentes à gestão de resíduos e à sua deposição em aterro.

O decreto-lei n.º 73/2011, de 17 de Junho, alteração ao decreto-lei n.º 178/2006, de 5 de Setembro, altera o regime da gestão de resíduos e transpõe a Diretiva n.º 2008/98/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de Novembro, relativa aos resíduos. Segundo o decreto-lei, este "estabelece o regime geral aplicável à prevenção, produção e gestão de resíduos" e aplica-se "às operações de gestão de resíduos destinadas a prevenir ou reduzir a produção de resíduos, o seu carácter nocivo e os impactes" resultantes da sua produção, gestão e utilização de recursos.

A gestão de resíduos inclui as "operações de recolha, transporte, armazenagem, triagem, tratamento, valorização e eliminação de resíduos", como também a monitorização dos locais de deposição (por exemplo os aterros) e o planeamento dessas operações (Martinho *et al*, 2011).

Relativamente à deposição de resíduos em aterros, o decreto-lei n.º 183/2009, alteração ao decreto-lei n.º 152/2002, de 23 de Maio, transpõe a Diretiva n.º 1999/31/CE, do Conselho, de 26 de Abril. De acordo com o decreto-lei, este tem como objetivo "evitar ou reduzir os efeitos negativos sobre o ambiente da deposição de resíduos em aterro" e estabelece as normas aplicáveis em matérias de conceção, construção, exploração, encerramento e manutenção pós-encerramento de aterros.

### **2.3. Parâmetros e Características dos Resíduos**

O conhecimento das características quantitativas e qualitativas dos resíduos sólidos urbanos é essencial para uma gestão adequada.

A composição física da massa de RSU, ou seja, a distribuição em percentagem de peso dos componentes presentes, está dependente de vários fatores, nomeadamente, das características do aglomerado, do clima, da estação do ano e do nível de vida das populações (Martinho *et al*, 2011; Levy e Cabeças, 2006).

Relativamente à composição química dos resíduos sólidos, esta depende da sua natureza e do seu grau de contaminação. A sua determinação não é expedita, pois os RSU são muito heterogêneos e é difícil obter uma amostra representativa para a análise da composição laboratorialmente (Martinho *et al*, 2011).

Segundo Levy e Cabeças (2006) e Martinho *et al* (2011), existem vários parâmetros que permitem caracterizar os RSU, nomeadamente:

- O peso específico, que se refere à quantidade de resíduos (em peso) que é possível armazenar numa unidade de volume. Este parâmetro é essencial para efetuar o dimensionamento dos equipamentos e das infra-estruturas;
- O poder calorífico, que se traduz na quantidade de calor libertado na combustão completa de uma unidade de peso de resíduos sólidos. Existe o Poder Calorífico Superior (PCS), onde o vapor de água formado volta a condensar, restituindo o calor de vaporização, e o Poder Calorífico Inferior (PCI), onde o vapor de água não regressa à sua forma inicial, escapando-se com os gases de combustão pela chaminé. Através do PCI consegue-se avaliar a aptidão dos resíduos para a valorização energética;
- A relação Carbono/Azoto (C/N), que permite avaliar o estado de fermentação dos resíduos, pois estes contêm um elevado número de microrganismos termófilos que entram rapidamente em fermentação, provocando um aumento da temperatura que proporciona a destruição dos elementos patogénicos;
- A humidade, que corresponde à quantidade de água presente nos resíduos sólidos. Este parâmetro tem tendência a variar com a localização geográfica, com as condições atmosféricas e com a estação do ano. A humidade é um parâmetro importante, uma vez que influencia o poder calorífico dos resíduos e a velocidade de decomposição dos materiais que fermentam.

### **2.4. Aterro Sanitário**

A política nacional de gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) tem vindo a tornar-se cada vez mais importante, com metas e objetivos mais exigentes, elevando os padrões de qualidade exigidos no tratamento e destino final de RSU.

De acordo com o anexo I do decreto-lei n.º 73/2011, a deposição de resíduos em aterro constitui uma operação de gestão de resíduos, sendo considerada uma operação de eliminação. Também, segundo o decreto-lei n.º 183/2009, o aterro sanitário é uma "instalação de eliminação de resíduos através da sua deposição acima ou abaixo da superfície natural". Este conceito abrange tanto as instalações de eliminação interna, onde o produtor de resíduos efetua a sua própria eliminação no local de produção, assim como as instalações permanentes utilizadas para armazenamento temporário, com uma vida útil superior a um ano.

As soluções possíveis de tratamento e valorização dos resíduos sólidos são várias, contudo o aterro sanitário será sempre uma componente muito importante do Sistema de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, pois está presente quer seja uma solução de fim-de-linha que complemente outros processos de tratamento, quer seja uma solução de tratamento (Levy e Cabeças, 2006).

A implantação de um aterro sanitário assenta fundamentalmente na preservação da qualidade do ambiente e no cumprimento das exigências expostas no decreto-lei n.º 183/2009, que enquadram a proteção das águas subterrâneas e superficiais, o controlo dos efluentes residuais líquidos (águas lixiviantes) e gasosos (biogás), controlo de deposição dos resíduos e exploração do aterro e monitorização global do aterro e zonas envolventes (Levy e Cabeças, 2006).

### **2.4.1. Sistemas de proteção ambiental**

Segundo Levy e Cabeças (2006), um aterro sanitário pode ser considerado um reator bioquímico. Os principais inputs no reator são os RSU e as águas pluviais e os outputs são, essencialmente, o biogás e as águas lixiviantes, que resultam da decomposição das componentes biodegradáveis presentes nos RSU e que são suscetíveis de poluir o ambiente.

De acordo com o decreto-lei n.º 183/2009, o aterro sanitário deve obedecer a um conjunto de requisitos mínimos de proteção ambiental passiva e ativa, de forma a prevenir e a controlar a poluição.

O sistema de proteção ambiental passivo refere-se à camada de solo subjacente ao aterro sanitário, segundo o decreto-lei n.º 183/2009, deverá garantir o máximo possível a prevenção da poluição dos solos e das águas superficiais e subterrâneas, tanto pelos resíduos como pelos lixiviados.

O sistema de proteção ambiental ativo, que entra diretamente em contato com os resíduos, deve assegurar as funções, exigidas no decreto-lei n.º 183/2009, nomeadamente deve impedir a infiltração das águas pluviais, evitar a infiltração de águas superficiais ou subterrâneas na massa de resíduos depositada, captar as águas lixiviantes e escoar para o sistema de tratamento e captar, tratar e valorizar, quando possível, o biogás produzido.

#### a) Sistema de Impermeabilização

O sistema de impermeabilização é constituído por uma barreira passiva e uma barreira ativa, cujo objetivo é o isolamento estanque dos resíduos e dos efluentes líquidos e gasosos no interior do aterro sanitário, evitando fugas para os terrenos adjacentes (Levy e Cabeças, 2006).

A barreira passiva pode ser uma barreira geológica natural ou artificial. Os requisitos expostos no decreto-lei n.º 183/2009 exigem um coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) máximo de  $10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$  e uma espessura do substrato superior a 1 m.

No entanto, é difícil encontrar um solo com estas características, sendo exigido um sistema de impermeabilização artificial constituído por uma camada de argila, não inferior a 0,5 m. Após esta camada deverá ser colocado uma camada de geocompósito bentonítico (GCL), com um coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) de  $2 \times 10^{-11} \text{ m.s}^{-1}$ .

A barreira ativa, segundo Levy e Cabeças (2006), é uma "barreira artificialmente colocada em todo o solo de fundação e taludes, constituída por geocompósitos e geossintéticos," dimensionada tendo em consideração as solicitações mecânicas mais desfavoráveis ao punçoamento, ao rasgamento e à tração.

A barreira ativa é composta por uma camada de geomembrana (HDPE ou PEAD) de 2,0 mm e uma camada de geotêxtil não tecido, para proteção mecânica da geomembrana ao punçoamento e ao rasgamento. Este geotêxtil tem de prolongar-se ao longo de talude cerca de 0,5 m, de forma a garantir a sobreposição.

A Figura 2.3 esquematiza o sistema de impermeabilização da zona basal do aterro sanitário.

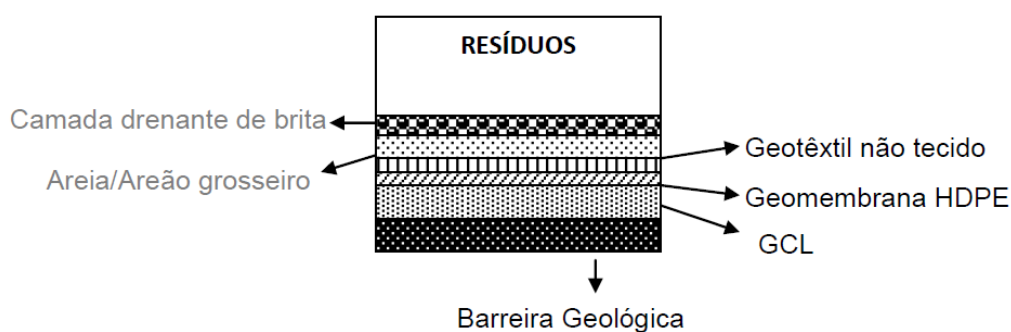


Figura 2.3 - Esquema do Sistema de Impermeabilização da Zona Basal do Aterro Sanitário

#### b) Sistema de Captação e Drenagem de Águas Lixiviantes

De acordo com o decreto-lei n.º 183/2009 entende-se por águas lixiviantes ou lixiviados, "os líquidos que percolam através dos resíduos depositados e que afluem de um aterro ou nele estão contidos". O sistema de drenagem e recolha deve ser dimensionado com objetivo de

garantir a rápida remoção dos lixiviados do aterro, para assim se controlar a altura de líquido sobre o sistema de impermeabilização e minimizar o risco de infiltração no solo.

Este sistema de proteção ambiental deve obedecer aos requisitos exigidos no decreto-lei n.º 183/2009, deste modo o fundo do aterro deve ter uma inclinação mínima de 2% em toda a área e deve possuir uma camada mineral drenante, colocada sobre o sistema de impermeabilização, com uma espessura mínima de 0,50 m e um coeficiente de impermeabilidade (k) de  $10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ .

A camada drenante deverá ser composta por 0,20 m de espessura de material natural com granulometria fina a média (brita não calcária) e uma camada de 0,30 m de espessura constituída por areia ou por areão grosseiro, com um coeficiente de impermeabilidade (k) de  $10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$  (Levy e Cabeças, 2006). Nos taludes, a camada drenante deverá ser composta por uma georede drenante (com duas camadas de geotêxtil não tecido em ambas as faces), com a função de filtro.

O sistema de drenagem de fundo possui valas principais e secundárias incorporadas na camada drenante e coletores, que permitem captar e drenar as escorrências líquidas para um poço de captação e derivação (Levy e Cabeças, 2006).

#### c) Sistema Separativo de Drenagem de Águas Pluviais

O sistema separativo de drenagem de águas pluviais, segundo o decreto-lei n.º 183/2009, deve ser dimensionado para evitar a formação desnecessária de lixiviados e assim diminuir o caudal afluente ao sistema de tratamento de lixiviados, otimizando o dimensionamento dos órgãos destinados ao seu tratamento.

A rede coletora de águas pluviais tem como objetivo desviar estas águas da massa de resíduos e consiste numa drenagem paralela à das águas lixivantes, constituída por valas, valetas, tubagens perfuradas a meia cana e a secção cheia. Os resíduos devem ser depositados de jusante para montante da célula, assim ao instalar a rede de drenagem paralela impede-se que as águas pluviais das zonas de montante (sem resíduos) escoem para a zona de jusante (com resíduos) (Levy e Cabeças, 2006).

#### d) Sistema de Captação, Drenagem e Queima de Biogás

Segundo o decreto-lei n.º 183/2009, o biogás produzido pelos aterros, devido à decomposição dos resíduos biodegradáveis, deve ser captado, tratado e utilizado de forma a reduzir ao máximo possível os efeitos negativos, ou seja, os danos no ambiente e os riscos para a saúde humana.

Este sistema deve ser composto por um sistema de drenagem de biogás, onde os gases são extraídos através de poços e drenos verticais. Os poços são constituídos por tubagem de



PEAD ranhurada a 360°, permitindo uma extração contínua do biogás (Martinho *et al*, 2011; Levy e Cabeças, 2006).

Após captado, o biogás deve ser conduzido para a estação de queima de biogás ou para a estação de valorização energética de biogás. A estação de queima do biogás tem como o objetivo a queima contínua do biogás captado. Enquanto na estação de valorização energética, o biogás recolhido pode ser utilizado como combustível para produção de energia, que deve ser injetada na rede elétrica (Martinho *et al*, 2011; Levy e Cabeças, 2006).

## **2.4.2. Águas lixiviantes**

### **a) Composição**

A produção de águas lixiviantes, ou de lixiviado, tem início logo que os resíduos sólidos são depositados no aterro sanitário (Hasar, *et al*, 2009). O lixiviado é o efluente residual líquido resultante da degradação da fração orgânica dos resíduos sólidos e apresenta características potencialmente perigosas, por isso os sistemas de proteção ambiental (o sistema de impermeabilização e o sistema de captação e drenagem de águas lixiviantes) são projetados e construídos para evitar fugas deste efluente (Calabrò, 2010; Levy e Cabeças, 2006).

O processo de degradação ocorre durante um curto período de tempo em condições aeróbias, passando depois a condições anaeróbias, com a exceção da camada superficial. A taxa de degradação pode ser afetada por vários fatores, nomeadamente, pela temperatura, pelo pH, pelas condições aeróbias ou anaeróbias e pelo tipo de microrganismos presentes (Williams, 2005).

A composição do lixiviado depende da heterogeneidade e composição dos resíduos, da biodegradabilidade dos resíduos e do estado em que se encontram, bem como do teor de humidade. No entanto, existem ainda outros fatores que influenciam a composição do lixiviado uma vez que se relacionam com os citados anteriormente, nomeadamente a idade do aterro, a precipitação e a taxa de percolação da água na massa de resíduos (Williams, 2005; Hasar *et al*, 2009).

As águas lixiviantes de aterros que recebem resíduos sólidos urbanos podem ser caracterizadas pela presença de quatro grupos principais de poluentes, nomeadamente, matéria orgânica dissolvida, macrocomponentes inorgânicos, metais pesados e componentes orgânicos xenobióticos (COXs) (Williams, 2005; Kjeldsen *et al*, 2002; Fodor e Klemeš, 2012).

Considerando os principais grupos de poluentes, os parâmetros que requerem maior cuidado por apresentarem valores elevados e por serem difíceis de controlar, para que se cumpram os requisitos do decreto-lei n.º 183/2009, são a Carência Química de Oxigénio (CQO), a Carência Bioquímica de Oxigénio ao quinto dia (CBO<sub>5</sub>), Carbono Orgânico Total (COT), o azoto amoniacal, os nitratos e o azoto total (Levy e Cabeças, 2006).

Estudos indicam que a razão entre o Carbono Orgânico Total e o Carbono Total (COT/CT) diminui ao longo do tempo. Este resultado indica que a percentagem de matéria orgânica diminui, enquanto a percentagem de matéria inorgânica aumenta ao longo do tempo (Ziyang, 2009).

Na Tabela 2.1 observa-se a composição típica do lixiviado de um aterro com exploração recente comparada com a composição do lixiviado de um aterro com exploração prolongada.

Tabela 2.1 – Comparação do lixiviado produzido em aterros com exploração recente e prolongada  
(Fonte: Tchobanoglous *et al*, 1993)

Parâmetro	Exploração recente (inferior a 2 anos)		Exploração prolongada (superior a 10 anos)
	Intervalo (mg/L)	Valor típico (mg/L)	Intervalo (mg/L)
pH	4,5-7,5	6,0	6,6-7,5
CBO <sub>5</sub>	2.000-30.000	10.000	100-200
COT	1.500-20.000	6.000	80-160
CQO	3.000-60.000	18.000	100-500
SST	200-2.000	500	100-400
Azoto orgânico	10-800	200	80-120
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	10-800	200	20-40
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	5-40	25	5-10
Fósforo total	5-100	30	5-10

Analisando os valores da composição do lixiviado nos diferentes momentos de exploração do aterro, constata-se que à exceção do pH, os restantes constituintes tendem a apresentar valores menores num aterro com exploração prolongada, ou seja, acima dos 10 anos de exploração.

#### b) Sistemas de tratamento

As águas lixivantes são muito carregadas, de cor negra e odor intenso. As elevadas concentrações de CQO, CBO<sub>5</sub> e azoto amoniacal e a baixa biodegradabilidade dificultam o processo de tratamento, sendo necessário conjugar processos físicos, químicos e biológicos. Como a composição dos lixiviados varia consoante a composição dos resíduos, não existe uma uniformização do método de tratamento a adotar para cada situação (Levy e Cabeças, 2006; Kulikowska e Klimiuk, 2008).

O efluente final (lixiviado tratado) pode ser descarregado numa linha de água ou na rede de drenagem de águas residuais municipal, dependendo o seu ponto de descargas da qualidade exigida. Devido às elevadas concentrações nas águas lixivantes torna-se difícil atingir os valores limites de emissão (VLE) de forma a permitir-se a sua descarga em linha de água. Em regra é necessário recorrer a processos de afinação, ou seja, a métodos por osmose inversa, a

filtração e a adsorção em carvão ativado, ou à evaporação múltipla, para se atingirem os VLE (Levy e Cabeças, 2006).

Devido à exigência e complexidade do tratamento necessário, torna-se mais vantajoso poder recorrer à descarga dos lixiviados na rede de drenagem de águas residuais municipal após o seu tratamento prévio.

Os processos unitários mais comuns utilizados nas Estações de Tratamento de Águas Lixiviantes (ETAL) são os descritos na Tabela 2.2. (Levy e Cabeças, 2006).

Tabela 2.2 - Processos de tratamento unitário de águas lixiviantes (Adaptado de Levy e Cabeças, 2006)

<b>Processo</b>	<b>Descrição</b>
<b>Lagoas de regularização</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Função de homogeneização e regularização do lixiviado afluente à estação;</li> <li>- Alguma redução das cargas afluentes através da sedimentação e da remoção de compostos biodegradáveis;</li> <li>- Impactes negativos devido à elevada área exigida e devido à possibilidade de serem fontes de odore.</li> </ul>
<b>Tratamento biológico por lamas ativadas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Constituído por um reator biológico (lagoa ou tanque) e por um decantador secundário ou por uma unidade de ultrafiltração, com recirculação de lamas ou do concentrado ao reator;</li> <li>- O fornecimento de O<sub>2</sub> proporciona a nitrificação, transformação do azoto amoniacal a nitrato;</li> <li>- Baixa remoção de CQO pelo que é necessário complementar com um processo de afinação;</li> <li>- Necessidade de instalar um tanque anóxico, para completar o processo nitrificação - desnitrificação.</li> </ul>
<b>Tratamento físico-Químico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Na coagulação-floculação-sedimentação é adicionado um agente coagulante ao lixiviado, numa câmara de mistura rápida, que promove a destabilização química, permitindo a aglomeração de colóides ou de partículas suspensas. Na floculação é adicionado um floculante, que promove o contacto entre as partículas destabilizadas, permitindo a formação de flocos de tamanho e de densidade superior dos flocos, que acabam por sedimentar no decantador químico;</li> <li>- O tratamento por coagulação-floculação-sedimentação tem grande eficiência na remoção de compostos inorgânicos, de sólidos suspensos e de partículas transportadas pelo lixiviado, bons resultados na correção do pH e precipitação de metais pesados;</li> <li>- O tratamento por oxidação-química consiste numa reação de oxidação-redução, que envolve transferência de eletrões entre um agente oxidante (que perde eletrões) e um agente redutor (que ganha eletrões);</li> <li>- O tratamento por oxidação-química é eficaz no controlo de odores, na redução de concentração de resíduos orgânicos e de conteúdos bacterianos e virais.</li> </ul>

<b>Osmose inversa</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Consiste na passagem de uma solução líquida por uma membrana semipermeável a uma pressão superior à pressão osmótica (acima de 1000 kPa), fazendo com que o solvente de uma solução mais concentrada passe para uma solução menos concentrada, rejeitando os contaminantes e criando uma solução concentrada;</li> <li>- Eficaz na remoção de CQO, CBO<sub>5</sub>, Azoto Total e SST.</li> </ul>
<b>Nanofiltração</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Consiste num processo de filtração que usa uma membrana semipermeável sobre uma pressão inferior à da osmose inversa (500 a 1000 kPa) e consegue rejeitar partículas com 0,001 µm;</li> <li>- Eficiente na remoção da CQO, da CBO<sub>5</sub> e na retenção de iões bivalentes.</li> </ul>
<b>Ultrafiltração</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Consiste num processo de filtração que usa uma membrana semipermeável sobre uma pressão inferior à da osmose inversa (70 a 700 kPa) e consegue rejeitar partículas com 0,005 µm;</li> <li>- Eficiente na retenção de sólidos, pelo que pode ser considerado um processo de pré-tratamento antes de um tratamento final, por exemplo a osmose inversa.</li> </ul>
<b>Lagoas de macrófitas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sistema de tratamento biológico em que são utilizadas culturas de macrófitas, que interatuam diretamente com o efluente ou servem de suporte aos microrganismos que o degradam;</li> <li>- Eficiente remoção de nutrientes (azoto e fósforo), agentes patogénicos e metais pesados, essencialmente utilizado com processo de afinação;</li> <li>- As desvantagens são que requer grandes áreas, as plantas são sensíveis às mudanças climáticas e a sua eliminação final, uma vez que se trata de bioacumuladores. Mas como vantagem são de fácil manutenção e instalação e de baixo custo.</li> </ul>
<b>Lagoas de evaporação</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Neste processo a quantidade de água lixiviante armazenada nas lagoas de evaporação, tem que se menor que a evaporação. Este processo está muito limitado às condições climáticas;</li> <li>- A exploração do aterro deve ter como objectivo que o caudal de lixiviado seja o menor possível;</li> <li>- Nesta situação a principal vantagem é a fácil e económica construção e operação, contudo como desvantagem aponta-se a produção de odores e a pouca flexibilidade do processo.</li> </ul>
<b>Carvão ativado</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Consiste na remoção de contaminantes das águas lixivantes através da sua adsorção por carvão ativado;</li> <li>- Principalmente utilizado como processo de afinação para águas que já passaram por tratamento biológico, uma vez que é muito eficiente na remoção de sólidos</li> </ul>

	<p>suspensos mas não na remoção de Azoto;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- É utilizado na remoção de odor, sabor, componentes orgânicos refratários e quantidades residuais de azoto, sulfatos e metais pesados;</li> <li>- A maior desvantagem está relacionada com a manutenção do carvão ativado (custo de regeneração e frequência).</li> </ul>
<b>Evaporação múltipla</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Consiste na evaporação da lixiviado através de torres sequenciais de evaporação (evaporação múltipla). Trata-se de um processo térmico que requer uma fonte de energia, utiliza-se principalmente o biogás mas não é suficiente.</li> <li>- Apresenta como subprodutos um efluente gasoso, que deverá ser tratado antes de descarregado na atmosfera, e um concentrado, que se permitido pode ser descarregado em aterro ou encaminhado para tratamento numa unidade de resíduos industriais.</li> </ul>

### 2.4.3. Biogás

#### a) Formação e composição do biogás

De acordo com o decreto-lei n.º 83/2009, de 10 de Agosto, entende-se por biogás "o gás produzido pela biodegradação anaeróbia da matéria orgânica". Segundo Tchobanoglous *et al* (1993), os principais constituintes do biogás (Tabela 2.3) são o amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), o monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), o hidrogénio ( $\text{H}_2$ ), o ácido sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), o azoto ( $\text{N}_2$ ) e o oxigénio ( $\text{O}_2$ ).

Tabela 2.3 - Constituintes do biogás (Adaptado de Tchobanoglous et al, 1993)

Componentes	Percentagem (%)
Metano	45-60
Dióxido de Carbono	40-60
Azoto	2-5
Oxigénio	0.1-1.0
Sulfídrico	0-1.0
Amoníaco	0.1-1.0
Hidrogénio	0-0.2
Monóxido de Carbono	0-0.2
Constituintes vestigiais	0.01-0.6

A perigosidade do biogás está relacionada essencialmente com a presença de metano na sua composição. Segundo Levy e Cabeças (2006), numa concentração entre "5 e 15% de volume, em mistura com o ar atmosférico, o metano torna-se explosivo". Relativamente ao dióxido de

carbono, este não é explosivo ou inflamável contudo pode ser prejudicial à saúde humana, causando asfixia em concentrações elevadas.

As reações biológicas mais importantes que ocorrem num aterro sanitário envolvem a matéria orgânica e levam à produção do biogás e do lixiviado. Estas reações ocorrem numa primeira fase em condições aeróbias, onde o dióxido de carbono é o principal gás produzido, e depois em condições anaeróbias, onde a matéria orgânica é convertida, principalmente, em dióxido de carbono e metano, ambos gases de efeito de estufa (Tchobanoglous *et al*, 1993, Williams, 2005; Lino e Ismail, 2011). Pelo que, a quantidade de biogás produzida depende da fração biodegradável presente nos RSU, da presença de microrganismos, das condições aeróbias e anaeróbias e da humidade presente na massa de resíduos (Williams, 2005).

O processo de degradação, onde estão envolvidas as reações biológicas, tem início com a deposição de RSU em aterro. Este processo ocorre em cinco fases e ao longo do tempo a composição do biogás sofre variações (Figura 2.4).

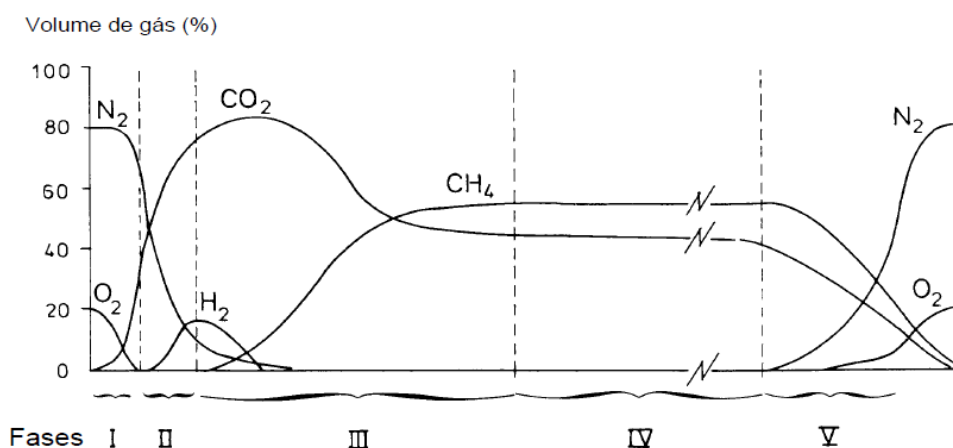


Figura 2.4 - Composição do biogás ao longo das fases de degradação (Fonte: Levy e Cabeças, 2006)

A primeira fase ocorre em condições aeróbias, pelo que é denominada fase aeróbia. Durante esta fase o oxigénio (O<sub>2</sub>) presente na massa de resíduos é rapidamente consumido pelas bactérias aeróbias, resultando na produção de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), de água (H<sub>2</sub>O) e de nitratos, no aumento da temperatura e na diminuição do pH. Esta fase tem uma duração bastante reduzida, uma vez que não há reposição do oxigénio (O<sub>2</sub>) consumido (Kjeldsen *et al*, 2002; Martinho *et al*, 2011).

Quando o oxigénio (O<sub>2</sub>) é totalmente consumido, a massa de resíduos entra em condições anaeróbias que suportam as reações de fermentação. Inicia-se assim a segunda fase, designada pela primeira fase de transição (hidrólise e fermentação).

Na segunda fase, a matéria orgânica sólida é hidrolisada pelas bactérias fermentativas e transformada essencialmente em ácidos gordos, álcoois e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Por ação

das bactérias acidogénicas, esses ácidos gordos e os álcoois são transformados em ácido acético, hidrogénio ( $H_2$ ) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ) (Levy e Cabeças, 2006). A concentração de azoto ( $N_2$ ) presente diminui devido à produção de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e hidrogénio ( $H_2$ ) (Martinho *et al*, 2011).

Devido à elevada produção de ácidos gordos e à elevada concentração de dióxido de carbono nesta fase o pH diminui significativamente, tendo como consequência o aumento da concentração de ferro, cálcio e metais pesados. Contudo, os sulfatos presentes combinam-se com estes compostos provocando a sua precipitação (Levy e Cabeças, 2006; Martinho *et al*, 2011).

A terceira fase, designada por segunda fase de transição (acetogénese), inicia-se com a produção de metano e com o decaimento da concentração de dióxido de carbono. Nesta fase intervêm dois grupos de bactérias, ou seja, as bactérias acetófilas, que transformam o ácido acético em metano e dióxido de carbono, e as bactérias hidrogenófilas, que transformam o hidrogénio e o dióxido de carbono em metano e água. Verificando-se também, uma diminuição da concentração de hidrogénio (Levy e Cabeças, 2006).

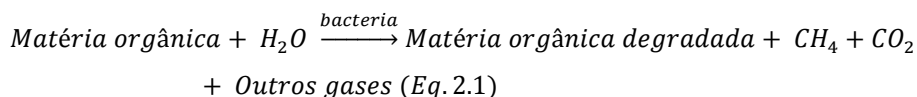
Nesta fase, verifica-se um aumento do pH e da alcalinidade, devido ao metabolismo ácido, que conjugado com o aumento da concentração de sulfureto, devido à redução do sulfato, provocam uma maior redução de metais pesados, ferro e cálcio (Levy e Cabeças, 2006).

A quarta fase, ou fase do metano (metanogénese), é a etapa em que a produção de metano atingirá o seu máximo. A estabilização da produção de metano dependente das condições do meio que afeta a atividade das bactérias, sendo que um dos fatores que maior influência tem na decomposição dos RSU é a humidade contida na massa de resíduos (Kjeldsen *et al*, 2002; Levy e Cabeças, 2006).

A estabilização pode demorar até alguns anos a ser atingida e pode prolongar-se entre 25 a 50 anos, nesta fase a concentração de metano mantém-se entre 40% a 65% do volume. A concentração dos ácidos é muito baixa, uma vez que se verifica uma rápida metabolização dos mesmos. Nesta fase também se verifica uma diminuição da temperatura, aproximando-se da temperatura ambiente e o valor de pH estabiliza entre 7,0 e 7,2 (Levy e Cabeças, 2006; Martinho *et al*, 2011).

Na quinta fase, designada fase de estabilização ou inertização, a massa de resíduos contem resíduos não biodegradáveis, inertes e matéria orgânica de difícil decomposição e constata-se uma diminuição da atividade bacteriana, pelo que se verifica uma diminuição da produção de biogás. Nesta fase, podem surgir zonas aeróbias na parte superior da massa de resíduos, no entanto o aterro sanitário já se encontrará numa fase de estabilização, que consoante as situações pode-se verificar a produção de pequenas quantidades de metano durante 50 a 75 anos no máximo (Levy e Cabeças, 2006; Martinho *et al*, 2011).

De acordo com Tchobanoglous *et al* (1993), a reação química representada pela Equação 2.1 descreve a decomposição anaeróbia dos RSU.



Através da Equação 2.1 verifica-se que a reação química envolve a presença de água. Em aterros, onde a humidade não é suficiente podem-se verificar situações em que os resíduos não sofreram qualquer degradação, pelo que se encontram inalterados após décadas. Desta forma, o volume de biogás produzido depende diretamente da reação estequiométrica, das condições hidrológicas locais e do período de tempo em que ocorre produção de biogás (Tchobanoglous *et al*, 1993).

#### b) Modelação do biogás - Modelo LandGEM

O modelo LandGEM, recomendado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (United States Environmental Protection Agency - USEPA), permite modelar as emissões dos gases produzidos em aterro, nomeadamente, as emissões de metano, recorrendo à capacidade de produção de metano e da quantidade de resíduos depositados (Scharff e Jacobs, 2006).

De acordo com Barros *et al* (2014), o modelo LandGEM pode ser descrito matematicamente pela Equação 2.2.

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 k L_0 \frac{M_i}{10} e^{-k t_{ij}} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Onde:

$Q_{CH_4}$  é a produção de metano anual no ano de cálculo ( $\text{m}^3/\text{ano}$ ) ( $\text{m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ )

$i$  é o incremento do tempo (1 ano)

$n$  é a diferença entre o ano do cálculo e o ano inicial de deposição de resíduos

$j$  é o incremento do tempo (0,1 ano)

$k$  é a taxa de geração de metano ( $\text{ano}^{-1}$ )

$L_0$  é a capacidade potencial de geração de metano ( $\text{m}^3 \cdot \text{Mg}^{-1}$ )

$M_i$  é a massa de resíduos depositados no ano  $i$  (Mg)

$t_{ij}$  é o ano da secção  $j^{\text{th}}$  da massa de resíduos  $M_i$  aceite no ano  $i^{\text{th}}$  (ano)

A taxa de produção de metano ( $k$ ) é influenciada pela degradação da massa de resíduos, ou seja, quanto maior for o valor de  $k$ , maior será a taxa de degradação. Este parâmetro é afetado, consequentemente, pelo teor de humidade da massa de resíduos, pela disponibilidade dos nutrientes para os microrganismos, pelo pH e pela temperatura da massa de resíduos (Pessoa, 2014), pelo que varia consoante o tipo e a localização do aterro e normalmente situa-se entre



0,04 e 0,05 m<sup>3</sup>.Mg<sup>-1</sup> para aterros convencionais segundo USEPA (1997), citado por Barros *et al* (2014).

Relativamente à capacidade potencial de geração de metano ( $L_0$ ), esta depende apenas da composição dos resíduos depositados no aterro, podendo variar entre 100 e 170 m<sup>3</sup>.Mg<sup>-1</sup> para aterros convencionais, segundo USEPA (1997), citado por Barros *et al* (2014).

Através dos resultados obtidos pelo modelo LandGEM, nomeadamente a produção de metano em m<sup>3</sup>/ano ou t/ano, é possível estimar a energia elétrica potencial e as emissões evitadas e associadas.

### c) Aproveitamento do biogás e monitorização da produção

A produção de biogás no aterro sanitário pode causar a formação de bolsas de biogás no interior da massa de resíduos. Quando se verifica uma rotura da bolsa, a mistura rápida do biogás acumulado com o ar atmosférico origina situações de incêndio e de explosão (Levy e Cabeças, 2006).

Tendo em consideração os perigos associados e o potencial energético do biogás, os projetos de aterros sanitários incluem o dimensionamento de sistemas de drenagem e captação de biogás, com queima em flare ou aproveitamento energético, que permitem a diminuição da acumulação de biogás no interior da massa de resíduos (Williams, 2005).

O elevado poder calorífico do biogás, produzido pela biodegradação da fração orgânica presente nos RSU depositados em aterro sanitário, potencia o seu aproveitamento energético. Uma vez que permite a utilização do biogás como combustível em processos de combustão e na produção de energia elétrica (Barros *et al*, 2014).

A monitorização do biogás produzido no aterro é importante para determinar se o mesmo é suscetível de causar danos na saúde humana e no ambiente. A monitorização deve acompanhar toda a fase de exploração e pós-encerramento até as concentrações de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e metano (CH<sub>4</sub>) descerem para níveis insignificantes para o ambiente (Williams, 2005).

O programa de monitorização refere a frequência com que o controlo deve ser efetuado e está dependente da idade do aterro, do tipo de resíduos, do sistema de captura e drenagem de biogás instalado. As técnicas a serem implementadas incluem a monitorização superficial e subterrânea, que recorre a sondas e poços ou furos de monitorização (Williams, 2005).

A monitorização superficial consiste na utilização de equipamentos portáteis que permitem detetar a ocorrência de fugas de biogás. A monitorização subterrânea recorre a sondas de gás para controlar a produção de biogás e a sua migração em profundidade (de 1 a 10 metros) na massa de resíduos e na área envolvente. As sondas podem permanecer no mesmo local durante longos períodos de tempo permitindo mapear a produção de biogás, desde o início da exploração até à fase de pós-encerramento do aterro sanitário. Os poços ou furos de

monitorização consistem em caixas do plástico poroso em contato direto com a massa de resíduos (Williams, 2005).

#### **2.4.4. Métodos de Exploração do Aterro**

A exploração do aterro sanitário deve realizar-se faseadamente, deste modo o aterro sanitário deve ser composto por vários alvéolos ou células, que permitam a criação de sectores de deposição de resíduos independentes. Quando a altura máxima de enchimento é atingida num alvéolo este é encerrado, continuando a ser controlado e monitorizado. O enchimento do aterro tem em consideração a construção de células diárias de RSU (volume diário de resíduos com um metro de altura) e de estratos de RSU, que traduzem a altura de sucessivas células diárias (Levy e Cabeças, 2006).

Os métodos de exploração, segundo Levy e Cabeças (2006), podem ser:

- Método tradicional, onde as frentes de trabalho recebem diretamente os resíduos descarregados das viaturas, que posteriormente são espalhados e compactados, formando a célula diária. A densidade máxima obtida situa-se entre os 600 e os 800  $\text{kg.m}^{-3}$ .
- Método por enfardamento, onde os resíduos são compactados e enfardados, em equipamento adequado, antes de serem depositados nas frentes de trabalho. Este método permite obter uma relação peso/volume uniforme (1,0 a 1,2  $\text{ton.m}^{-3}$ ), e como possui sempre as mesmas dimensões permite uma montagem mais eficaz da massa de resíduos e de melhor qualidade ambiental, estética e técnica.
- Método misto, que conjuga o método tradicional e o método por enfardamento, ou seja, o enchimento é realizado por fardos, contudo em zonas estratégicas o enchimento realiza-se por deposição direta dos resíduos ou o enchimento é realizado por camadas de fardo e de resíduos diretamente depositados.
- Método com trituração prévia dos resíduos, ou seja, este método recorre a equipamento de trituração/destróçamento prévio dos resíduos.

#### **2.4.5. Sistema de encerramento**

A fase de encerramento ou de selagem do aterro sanitário tem início quando a capacidade máxima é atingida, isto é, quando a altura da massa de resíduos atinge a altura definida em projeto ou expressa na licença de exploração. Esta fase consiste na colocação de uma camada de cobertura sobre o último estrato de resíduos (Levy e Cabeças, 2006; Williams, 2005).

Quando o aterro sanitário é encerrado, este vai continuar a sofrer processos de assentamento devido à consolidação da massa de resíduos, que ainda se encontra em processo de decomposição. A variação das condições climáticas pode provocar fissuras, devido à oscilação

entre saturação e secagem. Portanto, a cobertura final deverá estar preparada para resistir às várias condições, de forma a manter-se estável (Levy e Cabeças, 2006).

Os objetivos da camada de cobertura são conter os resíduos de modo a proteger as pessoas e os animais do contato direto, minimizar o escoamento superficial e impedir as águas da chuva e superficiais de percolarem no interior da massa de resíduos, com o objetivo de minimizar a produção de lixiviado. Também, pretende controlar as emissões de gases e impedir a entrada de ar na massa de resíduos, que pode interferir no processo de biodegradação anaeróbia e provocar a ocorrência de incêndios. (Williams, 2005; Levy e Cabeças, 2006).

O sistema de impermeabilização da camada de selagem final deve cumprir os requisitos exigidos no decreto-lei 183/2009, de 10 de Agosto. Por ordem ascendente, a camada de selagem para cumprir os requisitos exigidos deve incluir:

- Camada de drenagem de gases, que deverá ter uma espessura de 0,2 a 0,25 m;
- Camada mineral impermeável, constituída por uma camada de solos argilosos ou silto-argilosos, com 0,5 m e por geotêxtil não tecido com função de separação ou por geomembrana de 1,0 ou 1,5 mm de HDPE ou PEAD;
- Geotêxtil não tecido, com função de separação;
- Camada de drenagem de águas pluviais, com espessura superior a 0,2 a 0,25 m;
- Geotêxtil não tecido, com função de separação;
- Cobertura final com material terroso, com espessura superior a 1 m e composta por solos selecionados (0,7m) e terras vegetais (0,3 m).

A camada superior do sistema de cobertura final, onde se pode verificar o crescimento de vegetação, desempenha funções importantes na proteção do sistema. Esta camada permite reduzir a erosão causada pelas escorrências superficiais, reduzir a infiltração, minimizar os odores e contribui para a integração paisagística, que está dependente da utilização final da área (Levy e Cabeças, 2006; Williams, 2005).

## **2.4.6. Sistemas de monitorização**

Um aterro sanitário, segundo o decreto-lei n.º 183/2009, de 10 de Agosto, deve implementar um conjunto de sistemas de monitorização de parâmetros que acarretam riscos para o ambiente. Estes sistemas devem ser executados na fase de exploração e pós-encerramento do aterro sanitário, de acordo com os requisitos exidos na legislação em vigor.

### **a) Fase de exploração**

- Controlo de assentamentos e enchimento: de acordo com o decreto-lei n.º 183/2009, anualmente devem ser controlados e registados os potenciais assentamentos do terreno e da massa de resíduos, através da colocação de marcos topográficos; uma vez por ano

deve ser realizado um levantamento topográfico da massa de resíduos de forma a inferir a conformidade com o plano de enchimento projetado (Levy e Cabeças, 2006).

- Controlo de lixiviados: também segundo o decreto-lei n.º 183/2009, devem ser monitorizados vários parâmetros referentes às águas lixivantes como a frequência referida na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Controlo de lixiviados (Fonte: Decreto-lei n.183/2009, de 10 de Agosto)

Frequência	Parâmetros a monitorizar
Quinzenalmente	Nível de lixiviados
Mensalmente	Volume, pH, Condutividade, CQO, Cloretos, Amónio
Trimestralmente	Carbonatos/bicarbonatos, Cianetos, Arsénio, Cádmio, Crómio total (caso se aplique Crómio VI), Mercúrio, Chumbo, Potássio, Índice de fenóis, Chumbo, Potássio, Índice de Fenóis
Semestralmente	COT, Cloretos, Fluoretos, Nitratos, Nitritos, Sulfatos, Sulfuretos, Alumínio, Amónio, Bário, Boro, Cobre, Ferro, Manganésio, Zinco, Antimónio, Níquel, Selénio, Cálcio, Magnésio, Sódio, AOX, Hidrocarbonetos totais

- Controlo das bacias de lixiviados: deve incluir medições do caudal de entrada de lixiviados na bacia semanalmente e sempre que ocorra uma precipitação significativa, assim como controlar a capacidade disponível na bacia diariamente, de acordo com os requisitos exigidos no decreto-lei n.º 183/2009.
- Controlo das águas superficiais: deve ser realizado antes da exploração do aterro de forma a obter-se valores de referência, e trimestralmente, segundo os mesmos parâmetros definidos pela Administração de Região Hidrográfica (ARH).
- Controlo do biogás: deverá ser representativo de cada alvéolo do aterro e mensalmente devem ser realizadas medições aos parâmetros metano, oxigénio e dióxido de carbono. Estas medições devem ser realizadas nos drenos de biogás ou na entrada do queimador na coluna de aspiração (Levy e Cabeças, 2006).
- Controlo das águas subterrâneas: deve ser realizado antes da exploração do aterro, de forma a obter-se valores de referência, e durante a exploração na rede piezométrica de controlo, com a frequência e determinações analíticas referidas na Tabela 2.5, segundo o

decreto-lei n.º 183/2009. Este controlo tem como objectivo verificar a ocorrência de algum acidente inerente ao aterro sanitário (Levy e Cabeças, 2006).

Tabela 2.5 - Controlo de águas subterrâneas (Fonte: Decreto-lei n.º 183/2009, de 10 de Agosto)

Frequência	Parâmetros a monitorizar
Antes do início da exploração	Medição do nível, pH, Condutividade, COT, Carbonatos/bicarbonatos, Cianetos, Cloretos, Fluoretos, Amónia, Nitratos, Nitritos, Sulfatos, Sulfuretos, Alumínio, Bário, Boro, Cobre, Ferro, Manganésio, Zinco, Antimónio, Arsénio, Cádmio, Crómio total, Crómio IV (se aplicável), Mercúrio, Níquel, Chumbo, Selénio, Cálcio, Magnésio, Potássio, Sódio, Índice de fenóis, AOX
Mensalmente	pH, Condutividade, Cloretos
Semestralmente	Medição do nível, COT, Cianetos, Antimónio, Arsénio, Cádmio, Crómio total, Crómio IV (se aplicável), Mercúrio, Níquel, Chumbo, Selénio, Potássio, Índice de fenóis
Anualmente	Carbonatos/bicarbonatos, Fluoretos, Amónia, Nitratos, Nitritos, Sulfatos, Sulfuretos, Alumínio, Bário, Boro, Cobre, Ferro, Manganésio, Zinco, Cálcio, Magnésio, AOX

- Controlo dos dados meteorológicos: de acordo com o exigido no decreto-lei n.º 183/2009, os dados referentes ao volume de precipitação, à temperatura, à direcção e à velocidade do vento e, sempre que necessário, à evaporação e à humidade atmosférica devem ser registados diariamente.

#### b) Fase pós-encerramento

Segundo o decreto-lei n.º 183/2009, de 10 de agosto, durante a fase de pós-encerramento a monitorização do aterro sanitário de resíduos não perigosos deve incluir:

- Controlo anual dos assentamentos do terreno e da cobertura final do aterro;
- Controlo semestral da qualidade e do volume dos lixiviados gerados;
- Controlo semestral das águas superficiais, se presentes;
- Controlo semestral do biogás, de acordo com os mesmos parâmetros exigidos na fase de exploração, ou seja, metano, oxigénio e dióxido de carbono;
- Controlo das águas subterrâneas, semestralmente do nível piezométrico e dos parâmetros pH, condutividade e cloretos, e anualmente dos restantes parâmetros referidos na Tabela 2.5.

Durante esta fase também é exigida a manutenção das infra-estruturas do aterro, de forma a garantir o seu bom estado e funcionamento, nomeadamente, da cobertura final do aterro, do sistema de drenagem e de tratamento dos lixiviados, da rede de poços de registo e de drenagem dos lixiviados, bem como da rede de drenagem das águas pluviais e dos piezómetros de controlo da qualidade das águas subterrâneas. Relativamente aos gases, a eficácia do sistema de extração deve ser verificada anualmente.

## **2.5. Métodos geofísicos - Ensaios**

Os métodos geofísicos são uma ferramenta que tem permitido obter, de forma indireta e expedita, informação sobre as condições geológicas, hidrogeológicas e de contaminação do subsolo, através de técnicas não invasivas a partir da superfície do terreno (Rocha *et al*, 2003; Laureano, 2007).

Os métodos geofísicos utilizados na caracterização do subsolo podem ser classificados como potenciais, que incluem a gravidade e o magnetismo, e os métodos que utilizam campos de propagação, tais como o método de resistividade elétrica, os métodos eletromagnéticos e os métodos sísmicos (Dam, 2012).

A prospeção gravimétrica baseia-se em pequenas variações do campo gravitacional principal causadas pela distribuição heterogénia da massa do subsolo, para obter informação sobre a densidade, a profundidade e a geometria dos recursos geológicos. O método magnético mede as variações do campo magnético da Terra, permitindo obter informação sobre a profundidade e a geometria de corpos subterrâneos com anomalias magnéticas (Oliveira, 1986; Dam, 2012).

Os métodos eletromagnéticos baseiam-se na propagação de campos eletromagnéticos no subsolo e podem ser métodos de fonte ativa ou passiva. Os métodos de fonte ativa recorrem a transmissores artificiais próximos ou distantes do campo, já os métodos de fonte passiva recorrem a sinais naturais da terra. Os métodos eletromagnéticos são utilizados principalmente no ramo da hidrologia e na prospeção mineral, pois são sensíveis a corpos condutores, pelo que as variações no teor de argila, as zonas saturadas de água e a salinidade de um fluido são bons alvos (Laureano, 2007; Dam, 2012).

O método ground-penetrating radar (GPR) utiliza a energia eletromagnética para obter uma imagem do subsolo, permitindo por exemplo obter informação sobre a quantidade de água contida no solo (Lunt *et al*, 2005).

Relativamente aos métodos sísmicos, segundo Oliveira (1986), estes métodos baseiam-se "no facto de que as ondas elásticas apresentam diferentes velocidades consoante o tipo de material que atravessam". As técnicas mais utilizadas recorrem à reflexão sísmica, à refração sísmica, à ressonância sísmica e à onda superficial sísmica (Dam, 2012).

O método da resistividade elétrica permite deduzir e conhecer as características do subsolo, recorrendo a técnicas não invasivas a partir da superfície do terreno (Rocha *et al*, 2003). Na

secção 2.5.1. o método da resistividade elétrica será mais aprofundado, uma vez que foi o método aplicado no âmbito deste estudo.

### 2.5.1. Método de resistividade elétrica

O solo e os seus constituintes conduzem a eletricidade de diferentes modos, pelo que podem ser bons ou maus condutores de corrente elétrica. Este facto permite conhecer parâmetros físicos relacionados com a condução de corrente elétrica no solo, como é o caso da resistividade (Rocha *et al*, 2003).

O método da resistividade elétrica consiste na injeção de corrente elétrica, através de eléctrodos, à superfície do terreno em dois pontos, fechando um circuito. Forma-se um campo elétrico e a distribuição de potenciais pode ser medido pela diferença de potencial entre dois pontos também à superfície e através de eléctrodos (Oliveira, 1986, Rocha *et al*, 2003, Mota, 2014).

O parâmetro da resistividade é o inverso da condutividade elétrica, ou seja, quando mais baixo for a resistividade maior é a condutividade elétrica. A resistividade pode ser considerada o parâmetro que mede a resistência dos materiais em conduzir corrente elétrica e está dependente da natureza e do estado físico do material (Lago, 2009).

Os valores de resistividade sofrem uma diminuição com o aumento do teor de humidade e da quantidade de sais dissolvidos, pelo que a aplicação deste método apresenta elevadas vantagens em estudos ambientais e hidrogeológicos (Lago, 2009).

Todos os dispositivos ou configurações para a aplicação do método de resistividade elétrica são tetraeletródicos. O dispositivo básico possui dois eléctrodos de potencial elétrico ( $P_1$  e  $P_2$ ) e dois eléctrodos de injeção de corrente elétrica ( $C_1$  e  $C_2$ ), como se observa no esquema da Figura 2.5 (Mota, 2014).

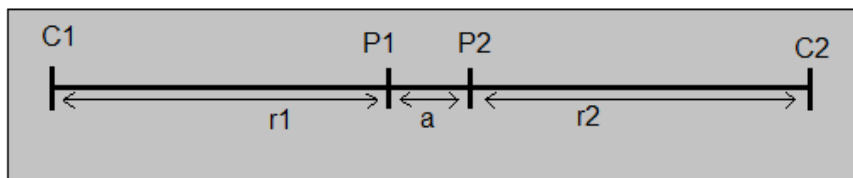


Figura 2.5 - Dispositivo básico tetraeletródico

Em teoria a resistividade elétrica considera a existência de um meio homogéneo e isotrópico, contudo na realidade verifica-se que os meios apresentam propriedades heterogéneas.

Estas propriedades causam modificações no campo elétrico, pelo que os dados obtidos referem-se à resistividade elétrica aparente (Lago, 2009; Mota, 2014).

A resistividade elétrica aparente varia com a posição e/ou com a direção do arranjo dos eletrodos e cada valor de resistividade reflete as propriedades médias do meio pelo qual a corrente passou (Lago, 2009).

A resistividade elétrica aparente ( $\rho_a$ ) de um meio onde a corrente elétrica é injetada é dada pela Equação 2.3 (Laureano, 2007; Lago, 2009).

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad \text{Eq. 2.3}$$

Onde:

$\Delta V$  é a diferença de potencial elétrico entre os pontos  $P_1$  e  $P_2$ ;

K é o fator geométrico, depende com o dispositivo adotado;

I a intensidade da corrente elétrica injetada no terreno.

A prospeção geofísica pelo método da resistividade elétrica pode ser realizada através de várias técnicas, tais como a Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e como os perfis de resistividade elétrica e para as quais existem diversos dispositivos ou configurações.

A diversidade de dispositivos tem como objetivo detectar o alvo a investigar e ultrapassar as dificuldades naturais do meio a estudar, devido à sua natureza heterogênea (Lago, 2009; Mota, 2014).

A Sondagem Elétrica Vertical pode ser realizada com recurso ao dispositivo de Wenner, que recorrendo a um alinhamento multieletródico designa-se por Sondagem Elétrica Vertical Contínua.

Na Figura 2.6, esquematiza-se a aplicação do dispositivo Wenner, onde I corresponde aos eletrodos de injeção de corrente elétrica e V aos eletrodos de potencial (Dam, 2012)

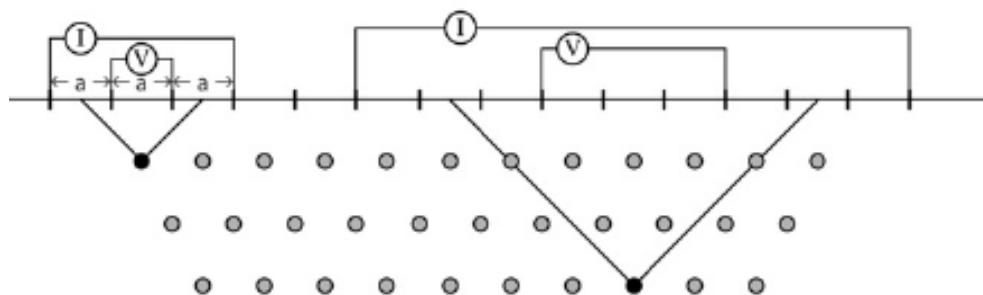


Figura 2.6 - Dispositivo de Wenner, adaptado de Dam, 2012



O espaçamento entre elétrodo é sempre igual ( $a$ ), assim o aumento deste espaçamento permite aumentar a profundidade de investigação.

O que se verifica na prática é que a cada nova leitura todos os elétrodo são deslocados para uma distância " $n$ " fator de " $a$ ", pelo que os elétrodo mantêm-se sempre em igual distância entre si (Lago, 2009).

Na aplicação dos perfis de resistividade elétrica recorre-se ao dispositivo de dipolo-dipolo, esquematizado na Figura 2.7, onde  $I$  corresponde aos elétrodo de injeção de corrente elétrica  $A$  e  $B$  e  $V$  aos elétrodo de potencial  $M_x$  e  $N_x$  (Lago, 2009).

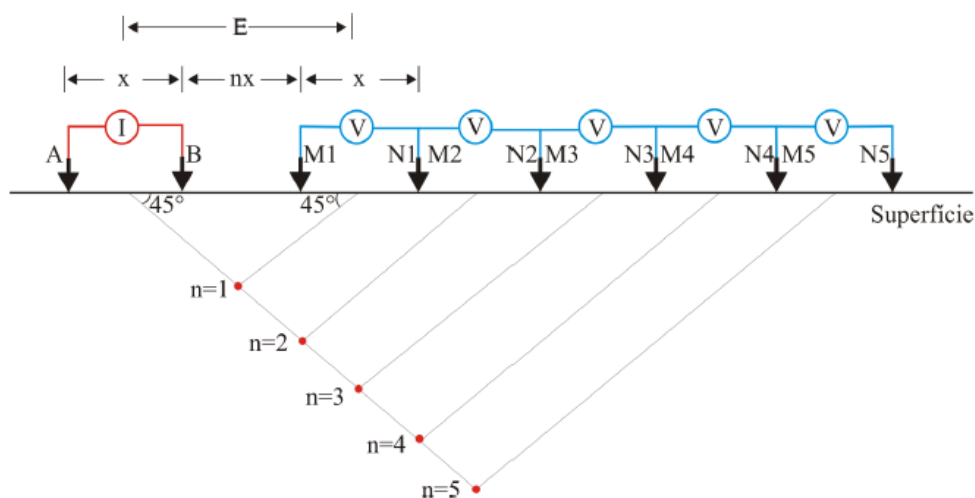


Figura 2.7 - Dispositivo de dipolo-dipolo, adaptado de Lago, 2009

Neste dispositivo, o espaçamento dos elétrodo de injeção  $AB$  é igual ao espaçamento dos elétrodo de potencial  $M_xN_x$ , sendo dispostos segundo o mesmo perfil. A profundidade de investigação aumenta com o espaçamento  $E$ , ou seja, aumenta com a distância entre o centro dos elétrodo de injeção e o centro dos elétrodo de potencial. Assim, a cada nova leitura os dipolos são deslocados para uma distância igual a  $X$  e os dados obtidos correspondem as diferentes profundidades ( $n=1, 2, 3, 4$  e  $5$ ) (Lago, 2009).

O dispositivo de Wenner possui boas condições para a leitura de potencial elétrico em meios de elevada heterogeneidade, pelo que apresenta baixos erros de leitura, e permite obter uma maior profundidade de investigação na zona central do perfil, contudo tem como desvantagem não responder bem a variações laterais.

O dispositivo de dipolo-dipolo, pelo contrário, apresenta como principal vantagem possuir uma boa resolução lateral para as variações de resistividade elétrica, no entanto apresenta erros de leitura elevados (Lago, 2009; Mota, 2014).

## **2.5.2. Aplicação do Método de Resistividade Elétrica.**

### **Estudos Realizados**

Muitos estudos se têm vindo a realizar com base no ensaio de resistividade elétrica e as suas aplicações são variadas. Segundo Aktarakçi (2008), citado por Oliveira (2009), as aplicações mais frequentes do método de resistividade elétrica baseiam-se na deteção de cavidades, na prospeção de águas subterrâneas, na caracterização geotécnica, nas prospeções de massas minerais, em investigações arqueológicas, na deteção de plumas de contaminação, nos mapas litológicos, bem como, na monitorização de terrenos sujeitos a técnicas de remediação e na monitorização de processos subterrâneos como recarga de aquíferos, infiltração, intrusão salina, túneis e infiltração em barragens.

Relativamente a estudos aplicados em locais de deposição de resíduos, o método de resistividade elétrica tem sido aplicado com várias finalidades, nomeadamente, a localização e delimitação de plumas de contaminação, assim como, o estabelecimento da direção do fluxo de propagação de plumas de contaminação (com aplicação sucessiva do método), a localização de locais de resíduos enterrados e a investigação da qualidade da água subterrânea (Oliveira, 2009).

Santos (2005) teve como objetivo determinar a extensão e evolução temporal da pluma de contaminação do lixiviado produzido pela degradação dos resíduos sólidos da área, sendo que para o efeito recorreu ao método de resistividade elétrica, que associado à interpretação geológica do local permitiu monitorizar a evolução da pluma.

Tureson (2006) recorreu ao método de resistividade elétrica e ao método ground-penetrating radar (GPR) para estimar a quantidade de água contida numa zona não saturada e a porosidade numa zona saturada, numa secção de areia.

Lago *et al* (2009) realizaram um estudo geofísico com aplicação do método de resistividade elétrica e do método de GPR, para avaliar a potencialidade de cada um na caracterização ambiental da área de estudo de deposição de resíduos de óleos lubrificantes.

Os resultados obtidos revelaram que o método de resistividade elétrica permitiu definir os limites laterais entre as zonas de deposição dos resíduos e as zonas de solo natural.

Oliveira (2009) recorreu ao método de resistividade elétrica para caracterizar a pluma de contaminação numa lixeira antiga.

No seu trabalho tentou, também correlacionar os resultados obtidos pelo método de resistividade elétrica com os dados obtidos pela aplicação de métodos diretos, por exemplo, as análises clínicas.

No final, concluiu existir uma boa correlação entre os resultados obtidos pelos vários métodos e a partir dos modelos de resistividade elétrica conseguiu obter valores de resistividade/conductividade que indicam a presença ou ausência e o grau de contaminação da área de estudo, assim como definir a pluma de contaminação e a estrutura sedimentar.

### 3. CASO DE ESTUDO - ATERRO DO BARLAVENTO

#### 3.1. ALGAR e Aterro Sanitário do Barlavento

A ALGAR, Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos, S.A., é a sociedade concessionária do sistema multimunicipal do Algarve. O sistema multimunicipal foi criado pelo decreto-lei n.º 109/1995, de 20 de Maio e é composto por 16 municípios, um total de 84 freguesias (Figura 3.1). Com este sistema iniciou-se a construção e exploração de dois aterros sanitários, o do Barlavento, situado em Portimão (Porto de Lagos) e o do Sotavento, situado em Loulé (Valo de Zebro).



Figura 3.1 - Municípios do Sistema Multimunicipal do Algarve. Fonte: Relatório Ambiental Anual do Aterro Sanitário do Barlavento Algarvio - 2012 (2013)

Na Tabela 3.1, são apresentados os dados referentes à população residente e a área de cada município do sistema multimunicipal em 1998 e 2012, assim como as respectivas densidades populacionais.

Tabela 3.1 - População residente, área e densidade populacional de cada concelho em 1998 e 2012

Concelho	População 1998 <sup>1</sup> (hab)	População 2012 <sup>1</sup> (hab)	Área <sup>2</sup> (km <sup>2</sup> )	Densidade Populacional 1998 (hab/km <sup>2</sup> )	Densidade Populacional 2012 (hab/km <sup>2</sup> )
Albufeira	28711	40190	140,7	204	286
Alcoutim	3912	2725	575,4	7	5
Aljezur	5121	5724	323,5	16	18
Castro Marim	6602	6588	300,9	22	22
Faro	56035	62281	201,9	278	309
Lagoa	19526	22783	88,3	221	258

<sup>1</sup> Dados estatísticos do INE correspondentes à população residente

<sup>2</sup> Dados estatísticos do INE correspondentes à superfície (km<sup>2</sup>) do território nacional

Lagos	24048	30776	213,0	113	144
Loulé	55744	69824	764,4	73	91
Monchique	7036	5755	395,3	18	15
Olhão	39526	45216	130,9	302	346
Portimão	42687	55209	182,1	234	303
São Brás de Alportel	9427	10552	153,4	61	69
Silves	33075	36724	680,1	49	54
Tavira	24561	25753	607,0	40	42
Vila do Bispo	5368	5223	179,1	30	29
Vila Real de Santo António	17292	19067	61,3	282	311
Total	378671	444390	4996,8	76	89

No geral, a densidade populacional aumentou de 1998 para 2012 em todos os concelhos, à excepção dos concelhos de Alcoutim, Monchique e Vila do Bispo que sofreram uma ligeira diminuição e do concelho de Castro Marim que se manteve constante.

Através da análise dos valores da Tabela 3.1, verifica-se que o concelho de Olhão apresenta o maior valor de densidade populacional, tanto em 1998 como em 2012. Pelo contrário, o concelho de Alcoutim apresenta o valor mais baixo. No entanto é o concelho de Loulé que possui o maior número de habitantes tanto em 1998 como em 2012.

O aterro sanitário do Barlavento constitui um subsistema da ALGAR, servindo os concelhos de Aljezur, Monchique, Silves, Albufeira, Lagoa, Portimão, Lagos e Vila do Bispo, com uma população de, aproximadamente, 202.500 habitantes (INE, 2012). O subsistema é constituído por quatro estações de transferências, seis ecocentros e uma estação de triagem, localizada no aterro sanitário, como se observa na Figura 3.2.

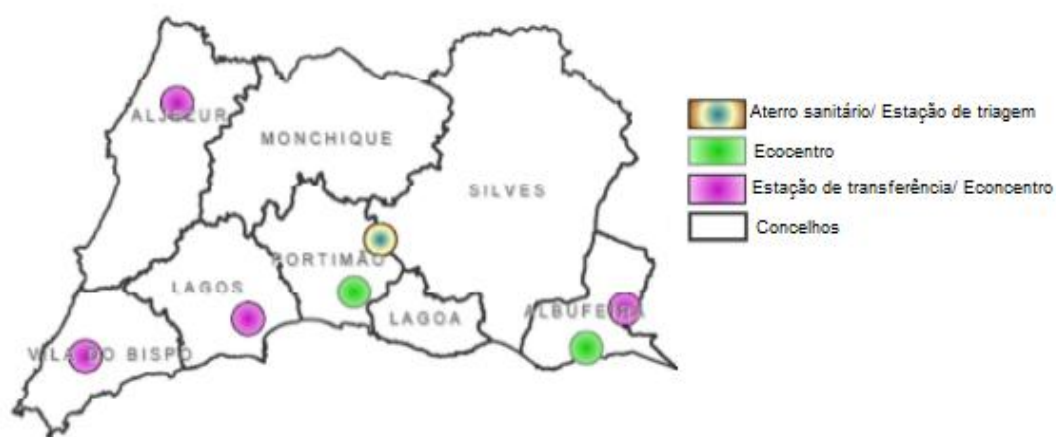


Figura 3.2 - Modelo técnico do subsistema do aterro sanitário do Barlavento

O aterro sanitário do Barlavento é formado por três células (A, B e C). A célula C encontra-se em exploração desde 2011 e as células A e B já se encontram encerradas desde 2002 e 2011, respetivamente.

O aterro, inicialmente, foi dimensionado para uma capacidade de encaixe de 1.750.00 m<sup>3</sup> na 1ª fase, esta capacidade correspondia às células de deposição A e B. No entanto, este volume foi ultrapassado devido à otimização do volume disponível na zona de encaixe entre estas células (A e B), assim como à reengenharia associada à utilização do volume da célula A, consequência da diminuição significativa do seu volume pela degradação da matéria orgânica presente (RAA ASB, 2013). Segundo dados fornecidos pelo grupo EGF (Cabeças, 2013), os quantitativos depositados são de 2.325.636 t, aproximadamente.

Relativamente, aos lixiviados produzidos no aterro sanitário do Barlavento, estes são encaminhados para a Estação de Tratamento de Lixiviados (ETAL), constituída por uma lagoa de regularização, um sedimentador e uma unidade de Osmose Inversa (secção 2.4.2.), que possui uma capacidade fixa de tratamento de 170 m<sup>3</sup>/dia (RAA ASB, 2013).

No aterro sanitário do barlavento foi instalada uma unidade de valorização energética de biogás (UEVB). O processo de aproveitamento do biogás, esquematizado na Figura 3.3, tem início nas células de deposição de RSU, onde o biogás é produzido e sobre as quais são feitos poços de captação, com o objetivo de captar o biogás produzido.

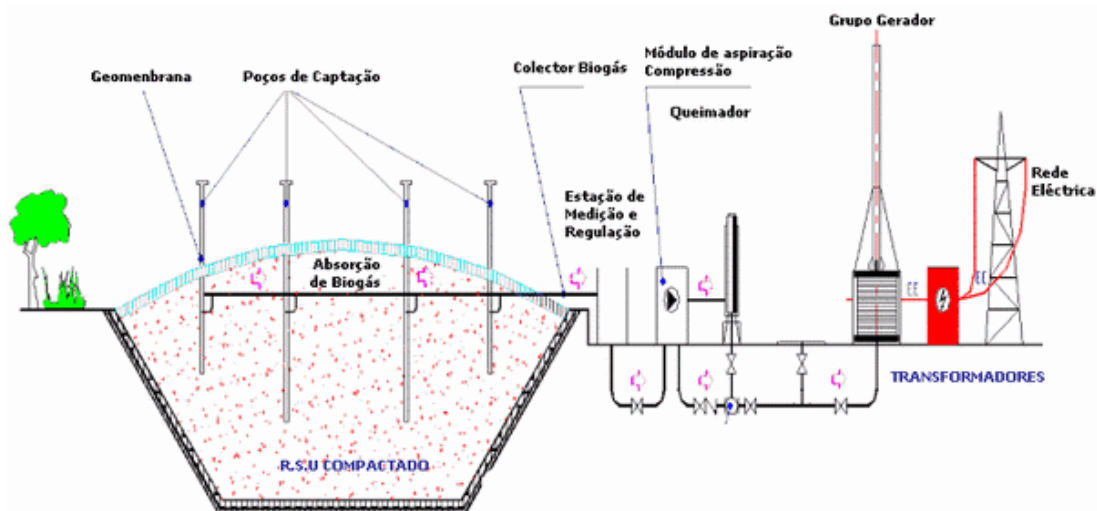


Figura 3.3 - Esquema do processo de aproveitamento do biogás produzido (Fonte: <http://www.algar.com.pt/pt/>)

Para captação do biogás produzido recorre-se a uma unidade de aspiração e compressão, situada junto ao queimador, responsável pela aspiração/sucção do biogás produzido nas células do aterro sanitário e, posterior, encaminhamento do mesmo para o grupo gerador (motor) que, através de transformadores, injeta a energia gerada na rede elétrica. Quando o

sistema não está em funcionamento ou a estação de compressão necessita de uma paragem prolongada o biogás é encaminhado para o queimador, onde o gás é queimado.

O biogás produzido e captado, antes de ser encaminhado para a unidade de produção de energia passa por uma unidade de refrigeração e secagem, com o objetivo de retirar a humidade presente nos gases. O processo consiste na diminuição da temperatura para valores inferiores ao ponto de condensação do biogás.

Após o processo de secagem dos gases, o biogás será enviado para uma unidade de limpeza por carvão ativado, com o intuito de remover os contaminantes gasosos presentes. O biogás circula nas unidades de limpeza (cones) em contracorrente e, ao atravessar o meio de enchimento composto por carvão ativado, os contaminantes são adsorvidos. Na Figura 3.4, observa-se a unidade de refrigeração e secagem e de limpeza por carvão ativado (cones).



Figura 3.4 - Unidade de refrigeração e secagem (à frente) e Unidade de limpeza de biogás por carvão ativado (atrás) (foto tirada a 18/02/2014 por Ana Silva)

### **3.2. Situação do aterro e descrição da problemática em estudo**

O aterro sanitário do Barlavento tem uma Unidade de Valorização Energética de Biogás (UVEB) instalada, com o objetivo de aproveitar o biogás produzido nas células (A, B e C). A valorização energética teve início após o encerramento e selagem da célula A (em 2002) e posterior selagem parcial da célula B (em 2006), já que ainda se encontrava em fase de exploração. Em 2009, foram colocadas condutas horizontais na zona de junção das células A e B e o biogás produzido nessa zona começou também a ser aproveitado.

Em 2011, a célula B foi encerrada e selada, bem como a zona de junção com a célula A. Após esta fase foram efetuados novos poços verticais de captação de biogás, passando a existir 100 poços ativos na célula B e na zona de junção e, 32 poços ativos na célula A, ou seja, passaram a um total e 132 poços ativos.

Com os novos poços verticais efetuados, em 2011, a UVEB passou a explorar dois motores de biogás, com 852 kW e 800 kW, perfazendo um total de capacidade instalada de, aproximadamente, 1,7 MW. À data, a célula C encontra-se em fase de exploração, estando também contemplado no aproveitamento do biogás nos taludes da célula captações pontuais, bem como a captação nas caixas de admissão dos lixiviados, com o objetivo de aumentar a quantidade do biogás afluente aos motores.

### **3.2.1. Produção de biogás**

A produção de biogás tem vindo a sofrer uma diminuição e os valores apresentados não correspondem aos esperados face à situação do aterro sanitário, isto é, com os volumes de RSU depositados e a idade do aterro estimou-se que a produção de biogás seria superior à que se tem registado. A situação descrita é alvo de estudo no presente trabalho, cujo objetivo será implementar medidas que incrementem a produção de biogás e, o consequente aumento da produção de energia. A problemática em análise surgiu devido a vários fatores, nomeadamente, devido à instalação de dois motores, com uma capacidade total de 1,7 MW que não está a ser aproveitada, desperdiçando recursos e não justificando o investimento realizado no equipamento. Outro fator está associado à falta de justificação para a diminuição da produção de biogás, ou seja, à inexistência de informação sobre a origem do problema. Deste modo e, em consequência da falta de informação, as medidas que possam ser implementadas podem não resolver o problema, uma vez que se desconhece a sua origem. Por último, outro fator está associado à vertente ambiental, uma vez que os principais gases que constituem o biogás, ou seja, o metano ( $\text{CH}_4$ ) e o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), são gases de efeito de estufa (GEE). O estudo realizado foi aplicado à célula B devido ao seu elevado potencial de produção de biogás. Esta célula encontra-se encerrada desde 2011 e, por isso deveria estar na fase de maior produção de biogás, ou seja, à data deveria ser a célula com maior influência na quantidade do biogás produzido, uma vez que se supõe estar na fase de metanogénese.

Para a realização do presente estudo, analisaram-se os Relatórios Ambientais Anuais do aterro sanitário de Barlavento (RAA ASB) de 2009, 2010, 2011 e 2012 e constatou-se que relativamente às medições das emissões gasosas dos drenos de biogás, estas apresentam repetidamente valores de metano ( $\text{CH}_4$ ) inferiores a 50% e alguma percentagem de oxigénio ( $\text{O}_2$ ), o que prejudica a qualidade e quantidade do biogás, uma vez que a metanogénese é uma fase que ocorre em condições anaeróbias. Para além disso, verifica-se nos RAA ASB de 2011 e 2012 que os valores correspondentes à percentagem de metano presente no biogás diminuíram, e os valores relativos à percentagem de oxigénio aumentaram de um ano para o outro nos drenos monitorizados, como se observa na Tabela 3.2, suportada pelo gráfico da Figura 3.5, que representa os valores médios percentuais de metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e oxigénio ( $\text{O}_2$ ).

Tabela 3.2 - Valores de monitorização do biogás: metano, dióxido de carbono e oxigénio (Fonte: RAA ASB 2009, 2010, 2011 e 2012)

	CH <sub>4</sub> (%)				CO <sub>2</sub> (%)				O <sub>2</sub> (%)			
Dreno	2009	2010	2011	2012	2009	2010	2011	2012	2009	2010	2011	2012
13	59,6		53,9	34	48,5		41,3	30,3	0,3		0,0	3,5
14	58,7		54,6	37,6	48,5		40,5	29,8	0,3		0,0	3
16	59,5	31,5		41,2	49,5	26,5		31,5	0,2	0		1,8
18	21,5	51,4	52,1		21,7	36,6	40,1		10,7	0,2	1,0	
20	52,7	49,3	55,5		48,9	42,3	41,2		0,3	0	0,0	
23	60,9	50,4	56,0		49,8	41,4	41,6		0,3	0,1	0,0	
24	48,6	50,5	41,6		43,6	42,1	31,8		0,4	0,0	2,3	
27			56,0	41,3			42,8	30,8			0,1	2,1
33			61,9	43,2			39,1	32,2			0,0	1,6
37			56,6	45,8			38,7	32,5			0,4	1,6
38			50,6	42,6			37,9	39,9			0,9	2,0
40			60,3	49,0			40,2	35,6			0,0	0,8
44			61,5	45,2			39,6	33,8			0,0	1,4
47			62,7	54,5			39,3	36,7			0,0	0,8
48			56,8	50,1			43,7	37,2			0,0	0,1
51			62,7	59,9			39,7	38,6			0,0	0,1
53			60,4	24,2			40,9	23,8			0,0	4,4
55			55,8	49,4			38,6	36,7			0,9	1,0
61			58,7	49,5			39,3	37,1			0,7	0,8
62			65,7	56,6			41,7	41,4			0,0	0,1
63			60,2	56,9			42,6	42,9			0,0	0,1
65			61,9	52,9			41,6	39,0			0,0	1,1
67			64,2	54,1			40,0	39,2			0,0	1,0
70			58,0	54,2			39,2	39,4			0,4	0,9
71			58,7	54,5			39,2	41,7			0,7	0,1
72			64,1	53,8			41,0	39,7			0,0	0,9
94			64,4	53,3			40,8	39,1			0,1	1,1

Ao observar o gráfico da Figura 3.5, constata-se que o ano de 2011 foi o período em que as médias percentuais de metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e oxigénio (O<sub>2</sub>) corresponderam aos melhores valores de biogás. Neste gráfico, também é evidente a diminuição da qualidade do biogás no ano de 2012, ou seja, observa-se uma diminuição da percentagem de metano (CH<sub>4</sub>) e de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e um aumento da percentagem de oxigénio (O<sub>2</sub>). Esta diminuição acompanha o encerramento da célula B, que foi em 2011.



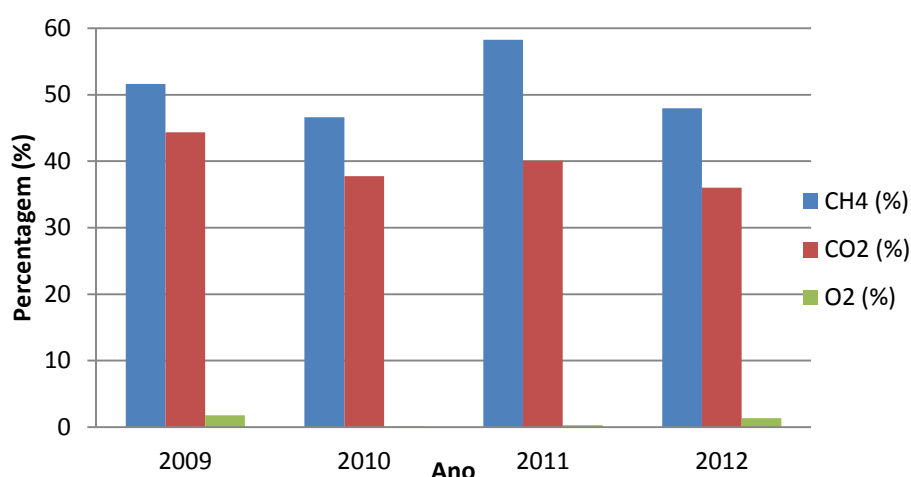


Figura 3.5 - Valores médios percentuais de monitorização do biogás: metano, dióxido de carbono e oxigénio (Fonte: RAA ASB 2009, 2010, 2011 e 2012)

### 3.2.2. Produção de energia elétrica no aterro sanitário do Barlavento

Com o intuito de justificar a necessidade do presente estudo e como base de comparação com os valores reais de energia elétrica produzida, recorreu-se ao "*Landfill Gas Emissions Model*" (LandGEM) para estimar os valores teóricos de biogás produzido no aterro do Barlavento.

Salienta-se, que para aplicação do modelo LandGEM foram introduzidos os volumes reais de RSU depositados no aterro sanitário do Barlavento e, os valores da taxa de geração de metano ( $k$ ) e da capacidade potencial de geração de metano ( $L_0$ ) foram consultados em bibliografia disponível. De acordo com Cabeças (2011), o valor de  $k$  é  $0,04 \text{ ano}^{-1}$  e o de  $L_0$  é de  $100,3 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$  para o caso do aterro sanitário do Barlavento.

Deste modo e, após a introdução de todos os dados necessários à aplicação do modelo (Tabela 3.3), este forneceu os resultados de forma imediata e sob a forma de tabelas ou gráficos, separando os valores de biogás, metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) produzidos em cada ano de funcionamento do aterro e ao longo de um horizonte temporal de 140 anos.

Tabela 3.3 - Dados para aplicação do modelo LandGEM

Dados necessários na aplicação do modelo LandGEM
Ano de início de exploração - 1998
Volumes de resíduos depositados ao longo do tempo de exploração
Capacidade de encaixe - 3.235.000 t
Valor do parâmetro $k$ ( $\text{ano}^{-1}$ ) - 0,04
Valor do parâmetro $L_0$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ) - 100,3
Seleção dos gases que serão avaliados - $\text{CO}_2$ e $\text{CH}_4$

Os resultados apresentados no gráfico da Figura 3.6 correspondem à estimativa de biogás produzido ao longo do tempo, em unidade de volume (m<sup>3</sup>). Estes podem estar sobrevalorizados, uma vez que o modelo assume que para todos os anos existem condições ideais de degradação dos resíduos, o que na realidade não se verifica.

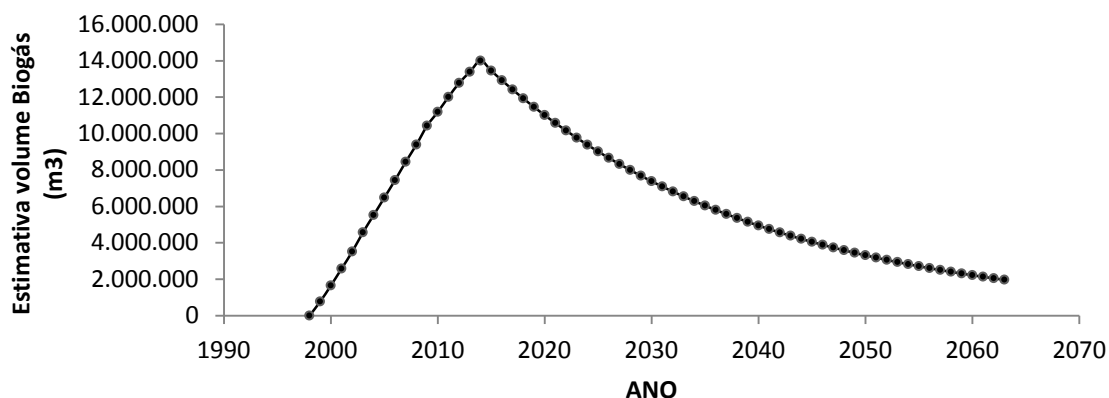


Figura 3.6 - Estimativa do volume de biogás produzido (Modelo LandGEM)

Após aplicação do modelo LandGEM e obtida a quantidade teórica produzida de biogás, estimou-se a energia elétrica potencial produzida no aterro sanitário do Barlavento.

Para a estimativa da energia elétrica potencial produzida foi necessário calcular o Poder Calorífico Inferior (PCI) do biogás. Deste modo os pressupostos que se assumiram para efetuar o cálculo foram:

- Uma molécula de biogás contém: 50% de metano (CH<sub>4</sub>) e 50% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)
- Peso molecular do CH<sub>4</sub> = 16 g/mol e Peso molecular do CO<sub>2</sub> = 44 g/mol
- Poder Calorífico Inferior do Metano = 50 MJ.kg<sup>-1</sup> (Despacho n.º17313/2008 de 26 de Junho de 2008)

Na Tabela 3.4 estão apresentadas as equações e os cálculos realizados para estimar o PCI do biogás. O valor estimado do PCI do biogás, assumindo os pressupostos acima enunciados, foi de 4,63 kWh.m<sup>-3</sup>.

Tabela 3.4- Cálculos efetuados para determinar o PCI do biogás

Equação 3.1	Cálculo do peso específico do metano
	$\frac{Massa}{Volume}(CH_4) = \frac{ton}{m^3} = 0,000667 ton.m^{-3} = 0,667 kg.m^{-3}$

	*No cálculo de peso específico recorreu-se aos resultados do LandGEM, correspondentes à quantidade e volume de metano produzido
Equação 3.2	<b>Conversão do metano de massa para energia</b> $50Mj.Kg^{-1} \times 0,667kg.m^{-3} = 33,35Mj.m^{-3}$
Equação 3.3	<b>Cálculo do PCI do metano</b> $PCI(CH_4) = \frac{33,35Mj.m^{-3}}{3600min} = 0,00926MWh.m^{-3} = 9,26kWh.m^{-3}$
Equação 3.4	<b>Cálculo do PCI do biogás</b> $PCI(biogás) = \frac{PCI(CH_4)}{2} = \frac{9,26}{2} = 4,63kWh.m^{-3}$

Após o cálculo do PCI do biogás, assumiram-se os seguintes pressupostos para o cálculo da energia elétrica potencial produzida:

- Estimativa de percentagem de biogás que é captado dos aterros = 70%
- Eficiência do motor = 40%

Obtidos os resultados do modelo LandGEM (produção de metano em  $m^3.ano^{-1}$ ), calculado o valor do PCI do biogás e considerando todos os pressupostos, estimou-se os valores do potencial de energia produzida por ano. A Tabela 3.5 estabelece a ordem e as fórmulas necessárias a este cálculo.

Tabela 3.5 - Fórmula aplicadas no cálculo do potencial de energia potencial (Adaptado de Silva, 2014)

Produção de metano ( $m^3.ano^{-1}$ )	Resultados do modelo LandGEM
Produção de biogás ( $m^3.ano^{-1}$ )	Produção de metano x 2
Biogás captado ( $m^3.ano^{-1}$ )	Produção de biogás x 0,70
Energia potencial do Biogás captado ( $kWh.ano^{-1}$ )	Biogás captado x PCI (biogás)
Potencial de energia produzida ( $MWh.ano^{-1}$ )	(Energia potencial do biogás captado x 0,40)/1000

Os resultados para a energia elétrica potencial produzida estão apresentados no gráfico da Figura 3.7, assim como os valores da real energia elétrica produzida injetada na rede.

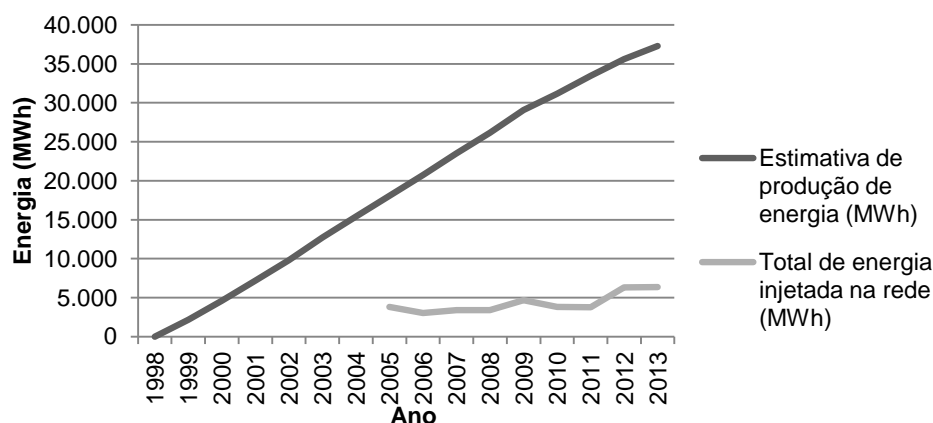


Figura 3.7 - Gráfico da energia elétrica potencial produzida (MWh) VS energia elétrica real produzida injetada na rede (MWh)

Ao analisar o gráfico da Figura 3.7, observa-se uma grande diferença entre a energia elétrica estimada e a energia elétrica real produzida, pelo que se torna evidente que a real produção de energia elétrica do aterro sanitário do Barlavento é muito menor do que a se estimou.

Embora na realidade se possa considerar que a energia real produzida seja inferior à energia elétrica potencial (estimada), nunca se perspetivou que a diferença pudesse ser tão significativa como a verificada nesta situação.

### 3.2.3.Comparação da produção de energia elétrica com outros aterros com tipologia semelhante

O aterro sanitário do Barlavento tem uma tipologia considerada semelhante ao aterro da Amarsul (Seixal) e da Suldouro, nomeadamente ao nível dos quantitativos de RU depositados. Deste modo, considerou-se importante comparar o desempenho do aterro em estudo (Barlavento) com estes dois.

Para a realização da comparação recorreu-se ao modelo LandGEM, que permitiu estimar a quantidade de biogás produzido em cada aterro, necessária ao cálculo da estimativa de energia produzida.

Os cálculos já tinham sido efetuados para o aterro sanitário do Barlavento na secção 3.2.2, pelo que os cálculos para a Amarsul e a Suldouro seguiram a mesma metodologia. Na Tabela 3.6, estão identificados os valores de  $k$  (taxa de geração de metano) e  $L_0$  (capacidade potencial de geração de metano) utilizados para cada caso.

Tabela 3.6 - Valores de  $k$  e  $L_0$  utilizados para correr o modelo LandGEM (Fonte: Cabeças, 2011)

Aterro Sanitário	$K \text{ (ano}^{-1}\text{)}$	$L_0 \text{ (m}^3 \cdot \text{t}^{-1}\text{)}$
Algar	0,04	100,3
Amarsul	0,06	97,0
Suldouro	0,06	101,7

Em termos de comparação tentou-se averiguar qual o desempenho real de cada aterro face ao que foi estimado pelo modelo LandGEM. Os valores obtidos na estimativa de produção de energia bem como os valores da energia exportada por cada aterro são apresentados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Comparação entre o aterro sanitário da Algar (Barlavento), da Amarsul (Seixal) e Suldouro dos quantitativos de RU depositados, da estimativa de produção de energia e da energia exportada

Ano	Quantitativos de RU depositados em aterro (ton)			Estimativa de produção de energia (MWh)			Energia exportada (MWh)		
	Algar	Amarsul	Suldouro	Algar	Amarsul	Suldouro	Algar	Amarsul	Suldouro
1998	98.208	-	-	0	-	-	-	-	-
1999	115.718	-	93.666	2.155	-	0	-	-	-
2000	125.821	-	164.436	4.610	-	3.099	-	-	-
2001	131.755	109.779	157.284	7.191	0	8.358	-	-	-
2002	151.385	94.605	169.970	9.800	3.464	13.074	-	-	-
2003	143.288	131.181	174.672	12.738	6.247	17.936	-	-	-
2004	149.115	185.347	175.516	15.383	10.022	22.669	-	2.637	2.306
2005	153.867	230.298	173.222	18.052	15.287	27.156	3.836	11.193	8.709
2006	164.967	274.545	179.915	20.721	21.663	31.305	3.051	10.917	8.474
2007	161.842	353.906	177.762	23.529	29.064	35.433	3.391	11.260	14.555
2008	178.849	344.116	180.379	26.158	38.538	39.250	3.400	11.814	20.040
2009	148.333	182.892	180.385	29.057	47.151	42.932	4.673	10.223	22.789
2010	159.679	178.232	180.577	31.173	50.176	46.399	3.810	8.474	27.960
2011	157.494	178.176	161.982	33.455	52.878	49.670	3.785	12.094	34.902
2012	141.023	166.305	144.891	35.599	55.420	52.136	6.330	12.298	35.071
2013	144.292	166.014	135.991	37.298	57.440	53.893	6.351	10.603	43.639

Após análise dos resultados, é possível verificar que para o ano de 2013 a relação da energia exportada face à estimada pelo LandGEM para a Algar e Amarsul apresenta valores de 5,85 e 5,42, respetivamente, comparativamente a 1,23 para a Suldouro.

Estes valores podem significar que o clima do sul e centro apresenta comportamento semelhante e o clima do norte é muito diferente, resultando na diferença acentuada entre o que se estimou inicialmente e o real.

Por outro lado, estes valores podem ser resultado do método de exploração de cada aterro. Assim, avaliando os valores obtidos, o método aplicado no aterro sanitário da Suldouro revela-se muito mais eficiente. Supõe-se que esta eficiência esteja diretamente relacionada com a colocação dos drenos de biogás (localização e método) e da cobertura final de impermeabilização das células.

### 3.2.4. Emissões

Com o objetivo de perceber a importância de evitar a emissão de biogás para atmosfera, ou seja, de metano ( $\text{CH}_4$ ) e de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), seja de forma direta ou indireta realizaram-se cálculos relativos às emissões evitadas devido ao aproveitamento do biogás para produção de energia (emissões diretas evitadas) e às emissões evitadas devido à injeção de energia na rede (emissões indiretas evitadas).

As emissões diretas evitadas consideram o biogás consumido nos motores de valorização energética, enquanto as emissões indiretas evitadas consideram a utilização de energia fóssil que se evita ao injetar energia na rede elétrica por aproveitamento do biogás.

Relativamente às emissões que não se conseguem evitar, contabilizaram-se todas em toneladas de  $\text{CO}_2$  equivalente ( $\text{ton CO}_2 \text{ eq}$ ). Para os cálculos destas emissões considerou-se 50% de metano e 50% de dióxido de carbono, como composição do biogás. Na Tabela 3.8 são apresentadas todas as fórmulas e cálculos realizados para a estimativa de  $\text{CO}_2$  equivalente emitido.

Tabela 3.8 - Estimativa da emissão de  $\text{CO}_2$  equivalente pela emissão de biogás para a atmosfera

<b>Estimativa do volume de <math>\text{CH}_4</math> emitido para a atmosfera (<math>\text{m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}</math>)</b>	(Estimativa do volume de biogás gerado (LandGEM) - Biogás consumido) x 0,5
<b>Peso específico do <math>\text{CH}_4</math> (<math>\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}</math>)</b>	$\frac{\text{Massa}}{\text{Volume}} (\text{CH}_4) = \frac{\text{ton}}{\text{m}^3} = 0,000667 \text{ ton} \cdot \text{m}^{-3}$ $= 0,667 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ <p>*No cálculo de peso específico recorreu-se aos resultados do LandGEM, correspondentes à quantidade e volume de metano produzido</p>
<b>Estimativa do volume de <math>\text{CH}_4</math> emitido para a atmosfera (ton)</b>	Estimativa do volume de $\text{CH}_4$ emitido para a atmosfera ( $\text{m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ ) x Peso específico do metano
<b>Estimativa do volume de <math>\text{CO}_2</math> emitido para a atmosfera (<math>\text{m}^3</math>)</b>	(Estimativa do volume de biogás gerado (LandGEM) - Biogás consumido) x 0,5
<b>Peso específico do <math>\text{CO}_2</math> (<math>\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}</math>)</b>	$\frac{\text{Massa}}{\text{Volume}} (\text{CH}_4) = \frac{\text{ton}}{\text{m}^3} = 0,00183 \text{ ton} \cdot \text{m}^{-3}$ $= 1,83 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ <p>*No cálculo de peso específico recorreu-se aos resultados do LandGEM, correspondentes à quantidade e volume de metano produzido</p>
<b>Estimativa do volume de <math>\text{CO}_2</math> emitido para a atmosfera (ton)</b>	Estimativa do volume de $\text{CO}_2$ emitido para a atmosfera ( $\text{m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ ) x Peso específico do metano
<b>Estimativa da emissão de <math>\text{CO}_2</math> equivalente (ton <math>\text{CO}_2 \text{ eq}</math>)</b>	(Estimativa do volume de $\text{CH}_4$ emitido para a atmosfera (ton) x 21) + Estimativa do volume de $\text{CO}_2$ emitido para a atmosfera (ton)

Para estimar as emissões diretas evitadas, ou seja, a quantidade de CO<sub>2</sub> equivalente destruído nos motores recorreu-se à Equação 3.5 e considerou-se os seguintes pressupostos:

- Quando o metano é destruído nos motores é convertido em dióxido de carbono que é emitido para a atmosfera;
- Uma molécula de biogás contém: 50% de metano (CH<sub>4</sub>) e 50% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)
- Peso molecular (CH<sub>4</sub>) = 16 g/mol
- Peso molecular (CO<sub>2</sub>) = 44 g/mol
- Como o peso molar do CO<sub>2</sub> é superior ao CH<sub>4</sub>, por cada mole de CH<sub>4</sub> que é destruída existe formação de CO<sub>2</sub>.

*Volume de CO<sub>2</sub>eq destruído nos motores (ton CO<sub>2</sub>eq)*

$$\begin{aligned}
 &= ((\text{Biogás consumido nos motores} \times 0,5) \times \text{Peso específico do CH}_4) \times 21 \\
 &- ((\text{Biogás consumido nos motores} \times 0,5) \times \text{Peso específico do CH}_4) \\
 &\times \frac{44}{16} \quad \text{Eq. 3.5}
 \end{aligned}$$

Relativamente às emissões indiretas evitadas é necessário considerar o total de energia elétrica injetada na rede e o fator de emissão médio do mix térmico fóssil PRO, que pode ser aplicado aos centros electroprodutores de produção em regime especial para estimar as emissões evitada. Este fator, segundo o anuário APREN (2012), tem o valor de 608 tonCO<sub>2</sub>/MWh.

Para o cálculo destas emissões aplica-se a Equação 3.6.

*Volume de CO<sub>2</sub> eq não emitido por injeção de energia na rede*

$$\begin{aligned}
 &= \text{Total de energia elétrica injetada na rede elétrica (MWh)} \\
 &\times \text{Fator de emissão médio do mix térmico fóssil PRO (Eq. 3.6)}
 \end{aligned}$$

Na Figura 3.8 e na Figura 3.9, apresentam-se os resultados para as emissões de CO<sub>2</sub> equivalente e para as emissões de CO<sub>2</sub> equivalente evitadas por destruição de biogás nos motores.

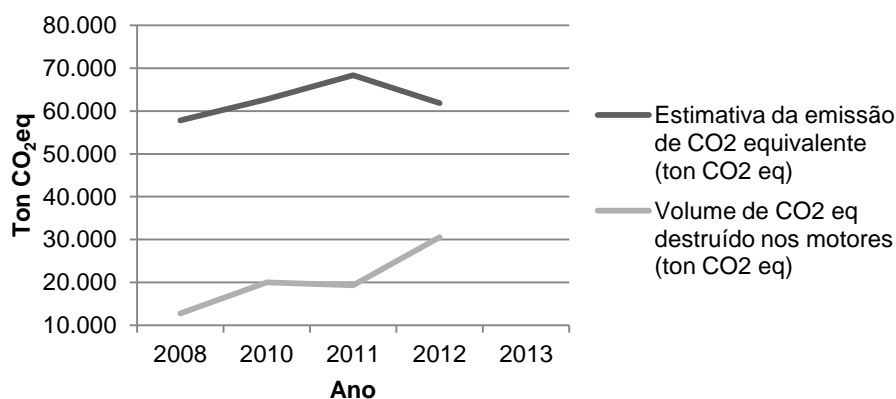


Figura 3.8 - Emissões de CO<sub>2</sub> equivalente e emissões de CO<sub>2</sub> evitadas por destruição nos motores

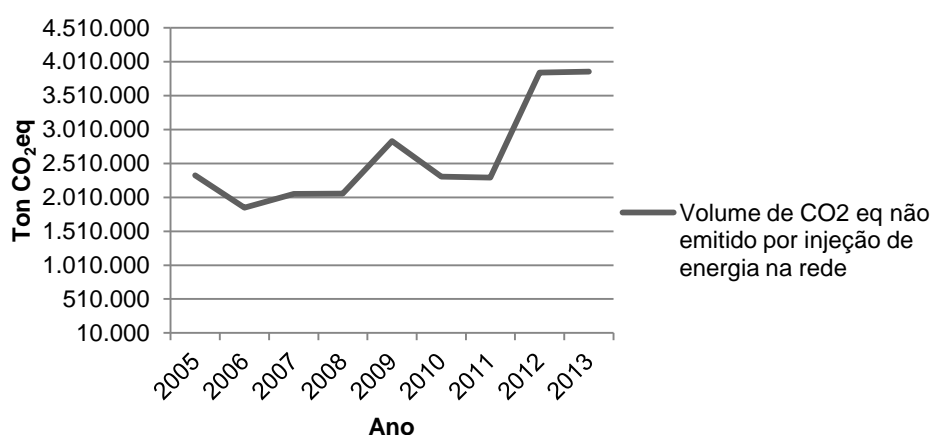


Figura 3.9 - Emissões evitadas por injeção de energia na rede elétrica

Ao observar a Figura 3.8 e a Figura 3.9, constata-se que as emissões evitadas são muito superiores às emissões que ocorrem, embora o CO<sub>2</sub> equivalente destruído nos motores seja menor que o total das emissões diretas que se estima que ocorram, as emissões evitadas por injeção de energia na rede elétrica são muito superiores, tornando o balanço bastante positivo do ponto de vista ambiental e económico.

### 3.2.5. Influência da localização geográfica

Um fator importante para a exploração de um aterro e com influência nos processos que nele ocorrem é a sua localização geográfica. O aterro sanitário de Barlavento localiza-se na região sul de Portugal, no Algarve, onde o clima é semi-mediterrâneo. Este clima é marcado por um inverno brando e um verão longo, assim como pela baixa precipitação e pela temperatura média anual próxima dos 18°C (Valle *et al*, 2012). Estas características fazem desta região, uma zona menos húmida quando comparada com outras regiões de Portugal.

Portanto, considerando as características da região onde se localiza o aterro sanitário do Barlavento assim, como a situação detetada, relativa à diminuição da produção de biogás,



especulou-se que a massa de resíduos estaria com o teor de humidade muito baixo pelo que, consequentemente existia inibição da atividade bacteriana, essencial ao processo de produção de biogás.

Assim, considerou-se de elevada importância confirmar ou anular as especulações realizadas, de modo a conhecer a realidade existente e a perceber quais as medidas que devem ser implementadas, com o intuito de reverter a situação verificada, ou seja, de incrementar a produção de biogás e, respetivo, aproveitamento energético.

### **3.3. Aplicação inovadora do ensaio geofísico de resistividade elétrica ao caso de estudo**

Para o estudo considerou-se fundamental perceber quais as características da massa de resíduos e quais os fatores que podem estar na origem da problemática em estudo. Portanto, ponderou-se a aplicação de uma técnica que permitisse obter, de forma expedita, informação sobre as condições de humidade da massa de resíduos da célula B do aterro sanitário do Barlavento.

Deste modo e, considerando as várias aplicações e os estudos realizados, os métodos geofísicos consideraram-se os mais eficientes para alcançar o objetivo pretendido, uma vez que permitem obter informação de forma expedita e indireta, recorrendo a técnicas não invasivas e capazes de recolher uma quantidade significativa de dados num curto período de tempo (Rocha *et al*, 2003; Laureano, 2007).

Como o parâmetro alvo a analisar seria o teor de humidade da massa de resíduos, considerou-se o método geofísico de resistividade elétrica o mais adequado a aplicar no estudo. Uma vez que este método para além de permitir aferir o modo como o solo e os seus constituintes conduzem a corrente elétrica (Rocha *et al*, 2003), tem tido êxito em várias aplicações no campo da geofísica ambiental.

No entanto, este método nunca foi aplicado a uma situação semelhante, ou seja, com objetivo de aferir as condições de humidade numa massa de resíduos, pelo que se considerou ser uma técnica inovadora e os resultados obtidos poderão impulsionar a aplicação desta técnica em situações de caráter semelhante.

Resumindo, a aplicação desta técnica no âmbito e nos objetivos do presente estudo considerou-se inovadora e dependendo dos resultados obtidos poderá tornar-se numa nova aplicação deste ensaio geofísico, servindo como ponto de referência para estudos similares.

### **3.4. Descrição do processo - Metodologia aplicada no Ensaio de Resistividade Elétrica**

No caso em estudo do Aterro Sanitário do Barlavento - célula B, o ensaio geofísico de resistividade elétrica seguiu a metodologia estudada e aplicada pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Para a realização do ensaio de resistividade elétrica foi necessário seguir os seguintes passos (adaptado de Oliveira, 2009):

1. Escolher o equipamento (quando e se for possível);
2. Planear a prospeção;
3. Escolher o dispositivo elétrico;
4. Colocar os elétrodo no solo e ligar os cabos;
5. Obtenção e registo das leituras;
6. Transferência dos dados para o computador;
7. Processar e tratar os dados.

O aparelho utilizado nos ensaios de resistividade elétrica é o resistímetro. Este aparelho é responsável pela injeção de corrente elétrica no subsolo através de dois elétrodo e pela medição da diferença de potencial entre os elétrodo de potencial (Oliveira, 2009). A escolha do equipamento para o ensaio de resistividade elétrica na célula B do aterro sanitário do Barlavento ficou restrita ao que o LNEC possui, ou seja, o equipamento utilizado foi o ABEM - TERRAMETER SAS 4000 (Figura 3.10).



Figura 3.10 - Equipamento de injeção da corrente elétrica e de leitura dos dados obtidos (ABEM - TERRAMETER SAS 4000)

O restante material necessário à realização deste ensaio foi:

- Bateria externa;
- Eléttodos;
- Cabo multicondutor e um seletor de eléctodos, que constituem o *Sistema Lund Corda*;
- Equipamento GPS;
- Equipamento de proteção (luvas e roupa adequada);
- Computador portátil.

O planeamento da prospeção foi realizado pelo LNEC em conjunto com a ALGAR, uma vez que para a realização do ensaio de resistividade elétrica é necessário conhecer o problema em estudo e as características do substrato (Oliveira, 2009), neste caso o substrato foi a massa de resíduos da célula B, do aterro do Barlavento.

Em escritório, o responsável do LNEC pelo ensaio estudou a planta topográfica de forma a perceber a viabilidade do ensaio e de que modo o mesmo poderia ser aplicado ao caso de estudo, de forma a atingir os objetivos pretendidos.

Segundo Mota (2014), devido à heterogeneidade dos materiais depositados no aterro sanitário, optou-se por utilizar dois dispositivos dipolares, o dipolo-dipolo e o Wenner, que apresentam a mesma disposição no terreno, contudo o modo de aquisição dos dados é diferente (secção 2.5.1.). Com a aplicação dos dois dispositivos nos quatro alinhamentos, obteve-se oito modelos de resistividade elétrica.

Relativamente à escolha dos alinhamentos, esta baseou-se sobretudo no comprimento máximo que cada alinhamento iria possuir tendo em consideração a sua localização, devido às características físicas da célula B.

O comprimento do alinhamento é um fator determinante uma vez que está relacionado com a profundidade de estudo que se consegue atingir com o ensaio de resistividade elétrica. Nesta situação, este ponto revelou-se fulcral uma vez que a massa de resíduos da célula B possui elevada profundidade (inicialmente mais de 60 metros), assim quanto maior fosse a profundidade de estudo maior representatividade teriam os resultados.

Na Figura 3.11, estão esquematizados em planta os quatro perfis de resistividade elétrica (PRE), ou seja, os alinhamentos realizados sobre a célula B do aterro sanitário do Barlavento.



Figura 3.11 - Localização dos alinhamentos para aplicação do método de resistividade elétrica

No terreno, começou-se por marcar o alinhamento PRE1 ao longo da estrada de acesso à célula B (Figura 3.11), foi necessário que o alinhamento se prolongasse até aos taludes de forma a obter-se o comprimento necessário à realização do ensaio de resistividade elétrica. Assim este alinhamento, com uma distância dipolar de 5 m, atingiu uma extensão de 200 m, que teoricamente permite alcançar uma profundidade de estudo de, aproximadamente, 30 m.

O alinhamento PRE1 (Figura 3.12), também se realizou com intuito de testar a viabilidade do ensaio geofísico de resistividade elétrica sob as condições encontradas numa massa de resíduos, neste caso a célula B do aterro do Barlavento, uma vez que esta foi a primeira aplicação do ensaio de resistividade elétrica a uma massa de resíduos de um aterro sanitário.



Figura 3.12 - Trabalhos no alinhamento PRE1 (foto tirada em 18/02/2014 por Ana Silva)

Depois seguiu-se para a marcação de alinhamento PRE3, que foi efetuada ao longo da estrada que se prolonga até ao topo da célula B (Figura 3.11). Este perfil, com uma distância dipolar de 5 metros, atingiu uma extensão de 200 m. Neste perfil (Figura 3.13), a maior dificuldade encontrada foi a colocação dos elétrodos, devido ao pavimento ser de difícil penetração.



Figura 3.13 - Trabalhos no alinhamento PRE3 (foto tirada em 18/02/2014 por Ana Silva)

De seguida, no topo da célula foi marcado e colocado o alinhamento PRE2 (Figura 3.11). Este alinhamento procurava ver se conseguia-se atingir uma maior profundidade de estudo, uma vez que este era o único alinhamento que apresentava potencial para atingir maior extensão devido as características físicas do terreno. Pretendia-se que o alinhamento possuísse uma extensão de 400 m para assim atingir uma profundidade de investigação de, aproximadamente, 60 m. No entanto devido às dificuldades encontradas no terreno que impossibilitaram a colocação de um eléctrodo, a extensão atingida foi de 390 m. Nesta situação, foi necessário aumentar a distância dipolar para 10 m, dado que o aumento da extensão do alinhamento implica um aumento da distância entre os eléctrodos.

A realização do ensaio de resistividade eléctrica neste alinhamento (PRE2) apresentou algumas dificuldades, especialmente devido à elevada inclinação dos taludes (Figura 3.14), que dificultou a colocação dos eléctrodos nos sítios assinalados.



Figura 3.14 - Trabalhos no alinhamento PRE2 (foto tirada em 19/02/2014 por Ana Silva)



Por último, seguiu-se para a cabeceira do talude virado para a célula C (Figura 3.11), onde foi colocado o alinhamento PRE4. Este alinhamento foi escolhido, principalmente, porque nessa zona era possível atingir uma extensão de 200 m, com uma distância dipolar de 5 m. As maiores dificuldades encontradas na realização do ensaio de resistividade elétrica neste alinhamento foi o transporte do material necessário à sua realização para o local, uma vez que este não possuía acesso para viaturas (Figura 3.15).



Figura 3.15 - Trabalhos no alinhamento PRE4 (foto tirada em 19/02/2014 por Ana Silva)

Em síntese, as extensões dos alinhamentos variaram entre 200 e 390 m. Na

Tabela 3.9, estão identificados os alinhamentos e as respectivas distâncias dipolares e extensões.

Tabela 3.9 - Distância dipolar e extensão de cada alinhamento

Alinhamento	Distância dipolar (m)	Extensão (m)
PRE1	5	200
PRE2	10	390*
PRE3	5	200
PRE4	5	200

De uma forma esquemática, no terreno para cada alinhamento seguiu-se a seguinte metodologia:

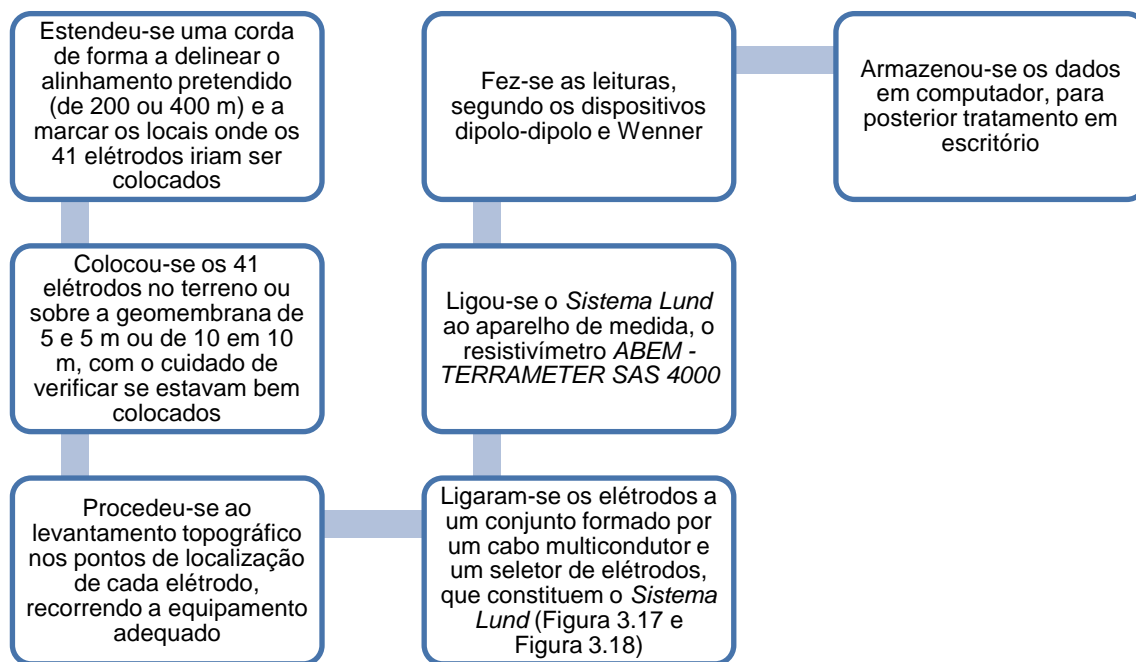


Figura 3.16 - Metodologia seguida para cada alinhamento na realização do ensaio de resistividade elétrica

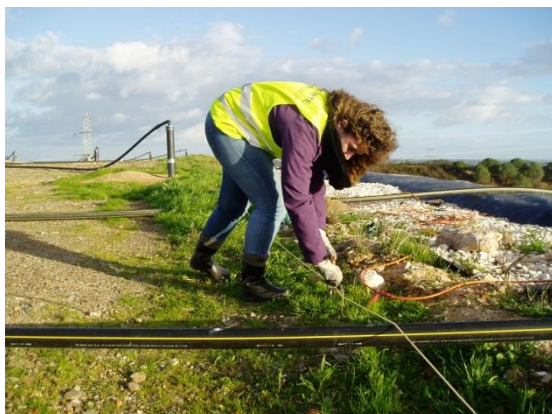


Figura 3.17 - Ligação dos elétrodoes (Foto tirada em 18/02/2014)

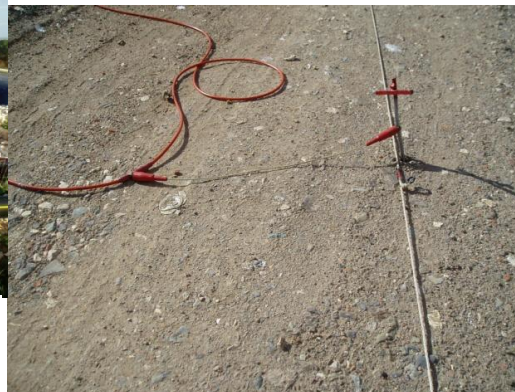


Figura 3.18 - Elétrodoes (Foto tirada em 18/02/2014 por Ana Silva)

## 4. RESULTADOS - ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Com a apresentação do relatório "Avaliação das condições para produção de biogás no aterro do Barlavento da ALGAR, com base no método da resistividade elétrica" elaborado pelo LNEC são apresentados e discutidos os resultados do ensaio de resistividade elétrica que decorreu no dia 19 de Fevereiro de 2014, no aterro sanitário do Barlavento.

O ensaio realizou-se em quatro alinhamentos para os dispositivos dipolo-dipolo e Wenner, pelo que se obteve oito perfis (dois para cada alinhamento). Nas Figuras 4.1 a 4.8 são apresentados os modelos de resistividade elétrica correspondente a cada alinhamento. A gama de cores utilizada foi igual para todos os perfis obtidos, pelo que aumenta do azul para o vermelho e varia entre 2-64 ohm.m.

### 4.1. Alinhamento PRE1

A Figura 4.1 e a Figura 4.2 representam os resultados obtidos no ensaio de resistividade elétrica no alinhamento PRE1, para os dispositivos dipolo-dipolo e Wenner, respetivamente.

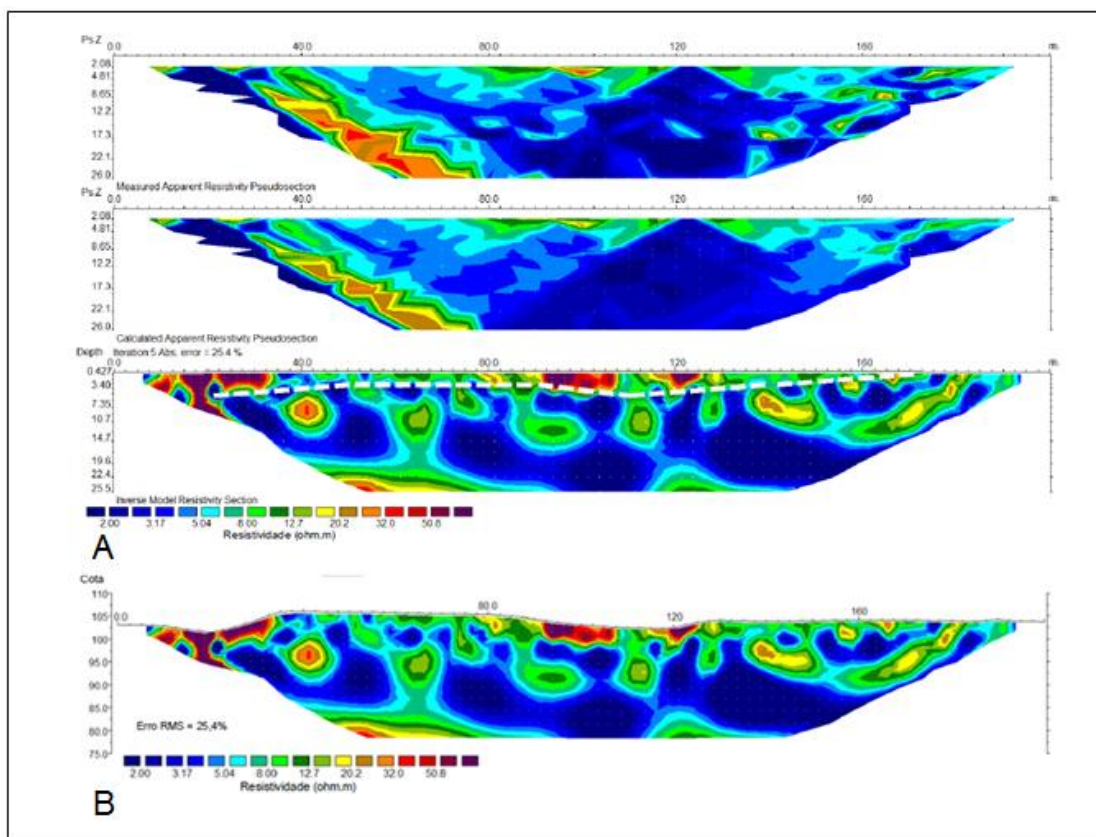


Figura 4.1 - Alinhamento PRE1. A - Do topo para a base, pseudo-seção das resistividades aparentes medidas no campo, pseudo-seção das resistividades aparentes calculadas e o modelo de resistividade elétrica para o dispositivo dipolo-dipolo, sem considerar a topografia. B - Modelo de Resistividade Elétrica para o dispositivo dipolo-dipolo, considerando a topografia.



Na Figura 4.1, observam-se os dados medidos no campo, as resistividades elétricas aparentes calculadas e o modelo de resistividade elétrica para o dispositivo dipolo-dipolo quer considerando quer não considerando a topografia. O erro RMS obtido na aplicação deste ensaio foi de 25,4%, após 5 iterações e a profundidade máxima atingida foi de 25,5 m.

Verifica-se, pela análise dos resultados obtidos, que os valores predominantes de resistividade elétrica situam-se na gama dos azuis, isto é, entre 2,0 e 5,0 ohm.m. Também se observa que a zona vadosa, limitada pela linha branca a tracejado e correspondente aos valores mais elevados de resistividade elétrica, atinge aproximadamente os 7 metros de profundidade.

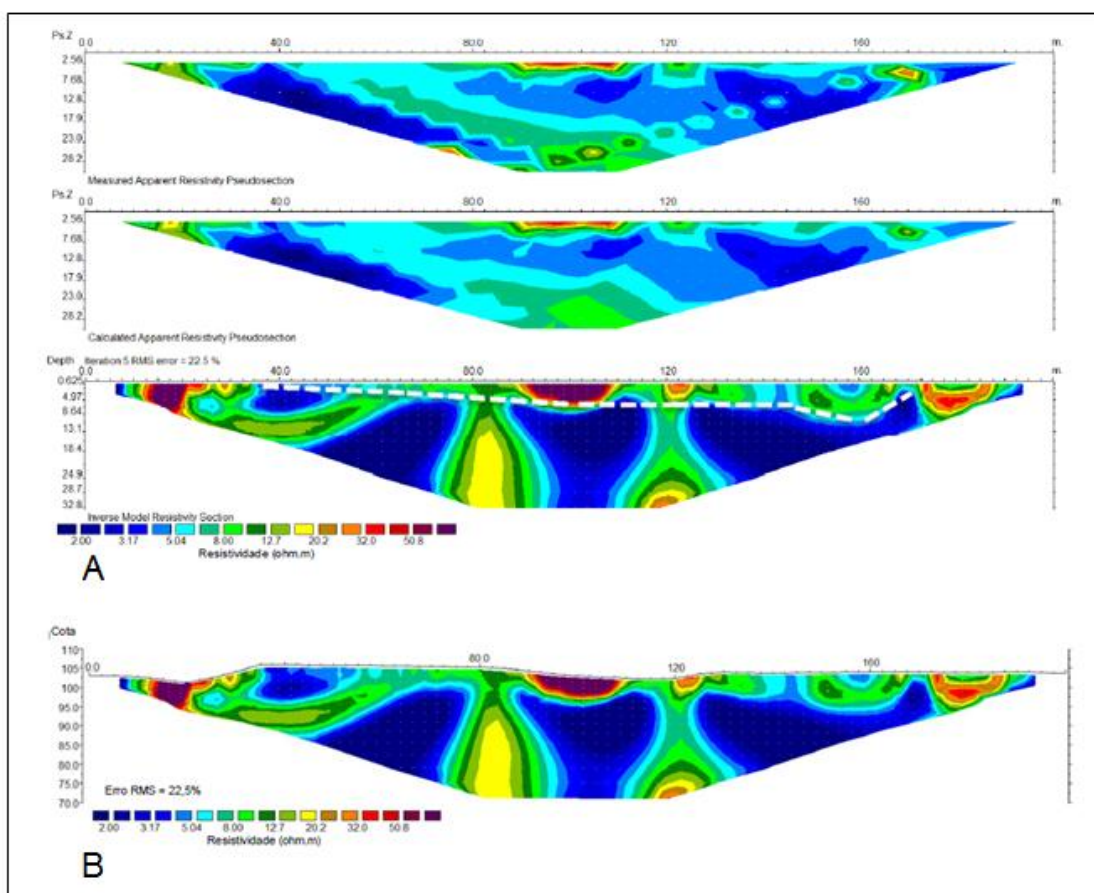


Figura 4.2 - Alinhamento PRE1. A - Do topo para a base, pseudo-seção das resistividades aparentes medidas no campo, pseudo-seção das resistividades aparentes calculadas e o modelo de resistividade elétrica para o dispositivo Wenner, sem considerar a topografia. B - Modelo de Resistividade Elétrica para o dispositivo Wenner, considerando a topografia.

Na Figura 4.2, são apresentados os dados medidos no campo, as resistividades elétricas aparentes calculadas e o modelo de resistividade elétrica para o dispositivo Wenner quer considerando quer não considerando a topografia. O erro RMS obtido na aplicação deste ensaio foi de 22,5%, após 5 iterações e a profundidade máxima atingida foi de 32,8 m.

Após análise dos resultados obtidos, constata-se que os valores correspondentes às zonas de baixa resistividade elétrica, situados na gama dos azuis (entre 2,0 e 5,0 ohm.m), encontram-se

predominantemente após a zona superficial. A zona vadosa (limitada pela linha branca a tracejado) atinge uma profundidade máxima de 13 m, aproximadamente.

## 4.2. Alinhamento PRE2

A Figura 4.3 e Figura 4.4 representam os resultados obtidos no ensaio de resistividade elétrica no alinhamento PRE2, para os dispositivos dipolo-dipolo e Wenner, respetivamente.

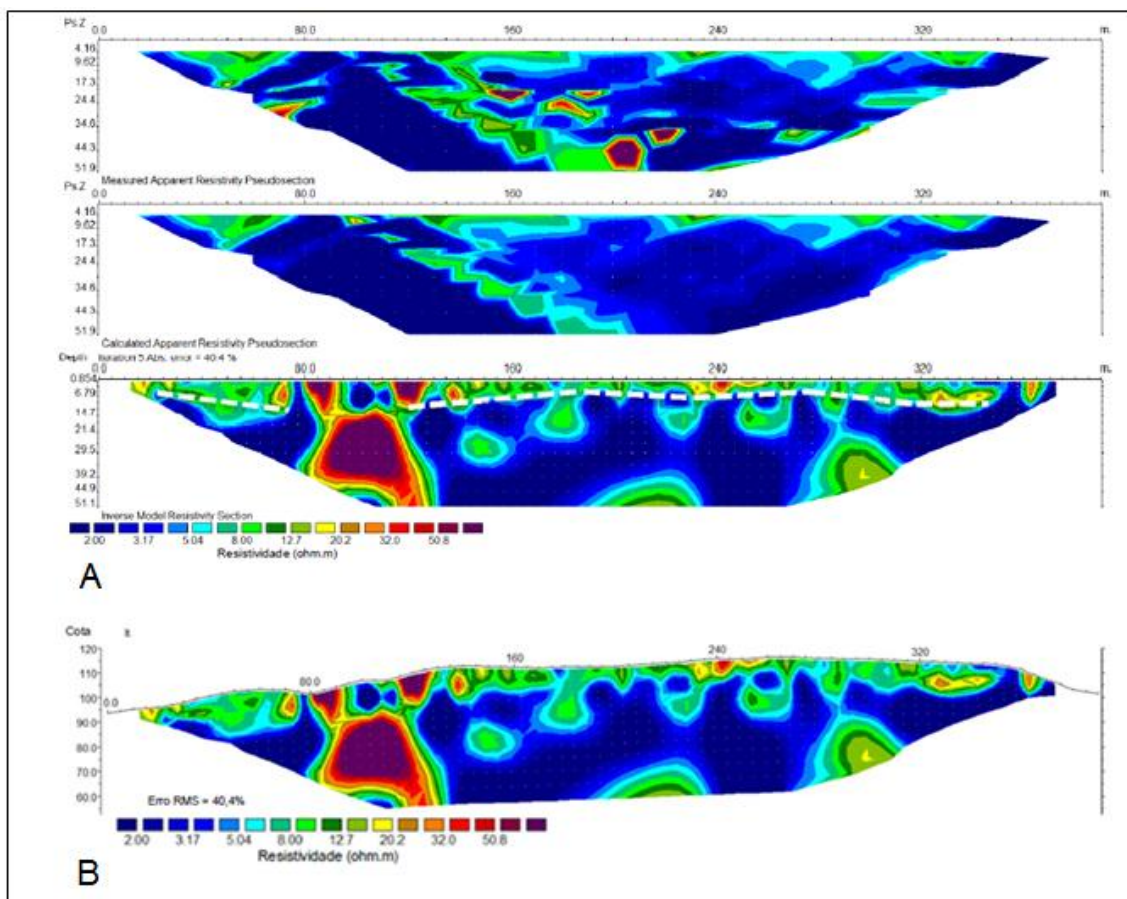


Figura 4.3 - Alinhamento PRE2. A - Do topo para a base, pseudo-seção das resistividades aparentes medidas no campo, pseudo-seção das resistividades aparentes calculadas e o modelo de resistividade elétrica para o dispositivo dipolo-dipolo, sem considerar a topografia. B - Modelo de Resistividade Elétrica para o dispositivo dipolo-dipolo, considerando a topografia.

Na Figura 4.3, são apresentados os dados medidos no campo, as resistividades elétricas aparentes calculadas e o modelo de resistividade elétrica para o dispositivo dipolo-dipolo quer considerando, quer não considerando a topografia. O erro RMS obtido na aplicação deste ensaio foi de 40,4%, após 5 iterações e a profundidade máxima atingida foi de 51,5 m.

Através da análise dos resultados obtidos, verifica-se que os valores de resistividade elétrica predominantes situam-se na gama dos azuis, isto é, entre 2,0 e 5,0 ohm.m. Também se observa que a zona vadosa, limitada pela linha branca a tracejado e correspondente aos valores mais elevados de resistividade elétrica, atinge cerca de 14 metros de profundidade.

Após esta profundidade os valores de resistividade elétrica são no geral inferiores, no entanto destaca-se uma zona com valores de resistividade elétrica elevada que se prolonga pela zona vadosa até à profundidade máxima atingida no ensaio e situa-se entre os 80 e os 130 m do alinhamento PRE2.

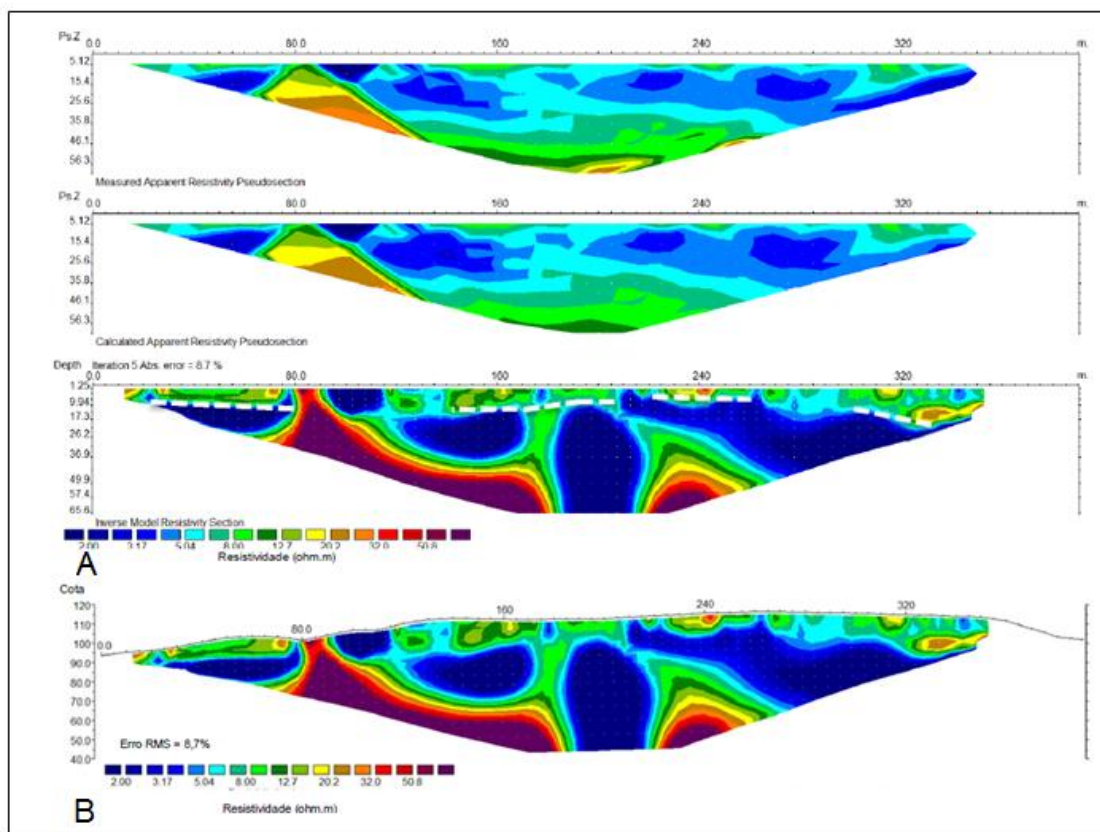


Figura 4.4 - Alinhamento PRE2. A - Do topo para a base, pseudo-seção das resistividades aparentes medidas no campo, pseudo-seção das resistividades aparentes calculadas e o modelo de resistividade elétrica para o dispositivo Wenner, sem considerar a topografia. B - Modelo de Resistividade Elétrica para o dispositivo Wenner, considerando a topografia.

A Figura 4.4, mostra os dados medidos no campo, as resistividades elétricas aparentes calculadas e o modelo de resistividade elétrica para o dispositivo Wenner quer considerando quer não considerando a topografia. O erro RMS obtido na aplicação deste ensaio foi de 8,7%, após 5 iterações, e a profundidade máxima atingida foi de 65,6 m.

Após análise dos resultados obtidos, constata-se que os valores correspondentes às zonas de baixa resistividade elétrica, situados na gama dos azuis (entre 2,0 e 5,0 ohm.m), encontram-se predominantemente após a zona superficial. A zona vadosa (limitada pela linha branca a tracejado) atinge uma profundidade máxima de 18 m, aproximadamente.

Neste alinhamento, PRE2, pela aplicação do dispositivo Wenner, verifica-se pelos resultados apresentados na Figura 4.4, a existência de uma zona de elevada resistividade elétrica, que se

prolonga desde a zona superficial até à zona mais profunda, onde se estende dos 80 m até aos 185 m do alinhamento PRE2.

### 4.3. Alinhamento PRE3

A Figura 4.5 e a Figura 4.6 representam os resultados obtidos no ensaio de resistividade elétrica no alinhamento PRE3, para os dispositivos dipolo-dipolo e Wenner, respetivamente.

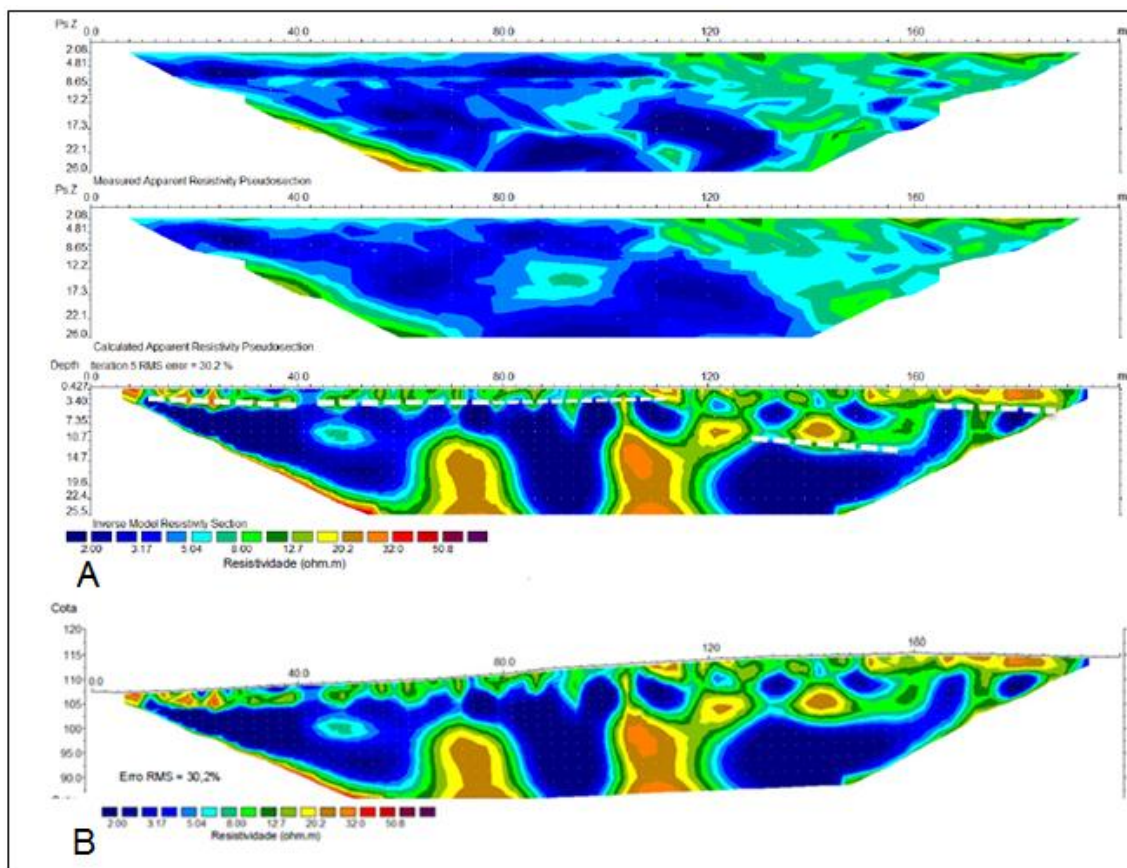


Figura 4.5 - Alinhamento PRE3. A - Do topo para a base, pseudo-seção das resistividades aparentes medidas no campo, pseudo-seção das resistividades aparentes calculadas e o modelo de resistividade elétrica para o dispositivo dipolo-dipolo, sem considerar a topografia. B - Modelo de Resistividade Elétrica para o dispositivo dipolo-dipolo, considerando a topografia.

Na Figura 4.5, são apresentados os dados medidos no campo, as resistividades elétricas aparentes calculadas e o modelo de resistividade elétrica para o dispositivo dipolo-dipolo quer considerando, quer não considerando a topografia. O erro RMS obtido na aplicação deste ensaio foi de 30,2%, após 5 iterações e a profundidade máxima atingida foi de 25,5 m.

Através da análise dos resultados obtidos, verifica-se que os valores de resistividade elétrica que predominam situam-se na gama dos azuis (entre 2,0 e 5,0 ohm.m), no entanto também se verifica que os valores de resistividade elétrica não atingem valores máximos, isto é, atingem os valores na gama do laranja, que corresponde aproximadamente a 32,0 ohm.m. Neste



modelo, a zona vadosa (limitada pela linha branca a tracejado) atinge cerca de 15 metros de profundidade.

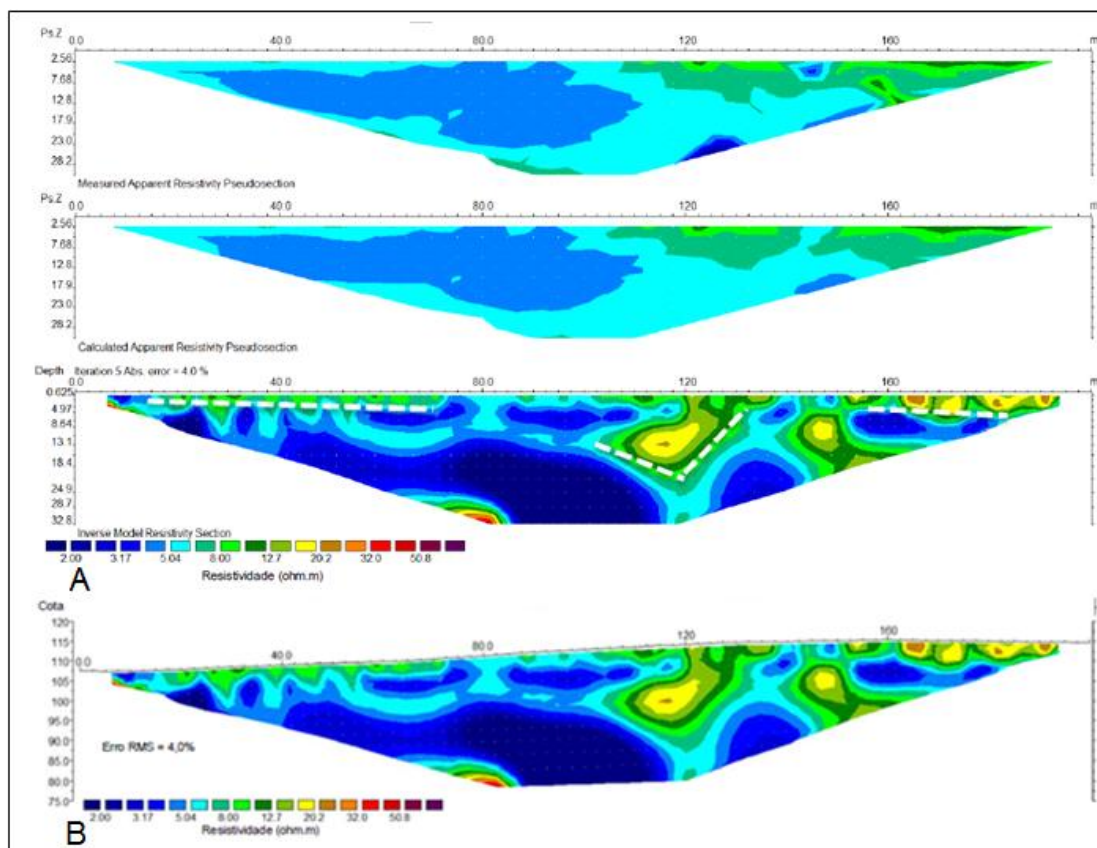


Figura 4.6 - Alinhamento PRE3. A - Do topo para a base, pseudo-seção das resistividades aparentes medidas no campo, pseudo-seção das resistividades aparentes calculadas e o modelo de resistividade elétrica para o dispositivo Wenner, sem considerar a topografia. B - Modelo de Resistividade Elétrica para o dispositivo Wenner, considerando a topografia.

A Figura 4.6, mostra os dados medidos no campo, as resistividades elétricas aparentes calculadas e o modelo de resistividade elétrica para o dispositivo Wenner quer considerando quer não considerando a topografia. O erro RMS obtido na aplicação deste ensaio foi de 4,0%, após 5 iterações, e a profundidade máxima atingida foi de 32,8 m.

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que as zonas que apresentam valores de resistividade elétrica acima dos 20,2 ohm.m são insignificantes comparativamente aos restantes valores de resistividade apresentados. Neste modelo para o dispositivo de Wenner, os valores de baixa resistividade elétrica (entre 2,0 e 5,0 ohm.m) prevalecem sobre os valores de resistividade elétrica correspondentes à zona do verde/amarelo, ou seja, entre 8,0 e 20,2 ohm.m.

Os resultados obtidos para o alinhamento PRE3, também mostram que a zona vadosa (limitada pela linha branca a tracejado) tem um máximo aos 21 m de profundidade, aproximadamente.

#### 4.4. Alinhamento PRE4

A Figura 4.7 e a Figura 4.8 representam os resultados obtidos no ensaio de resistividade elétrica no alinhamento PRE3, para os dispositivos dipolo-dipolo e Wenner, respetivamente.

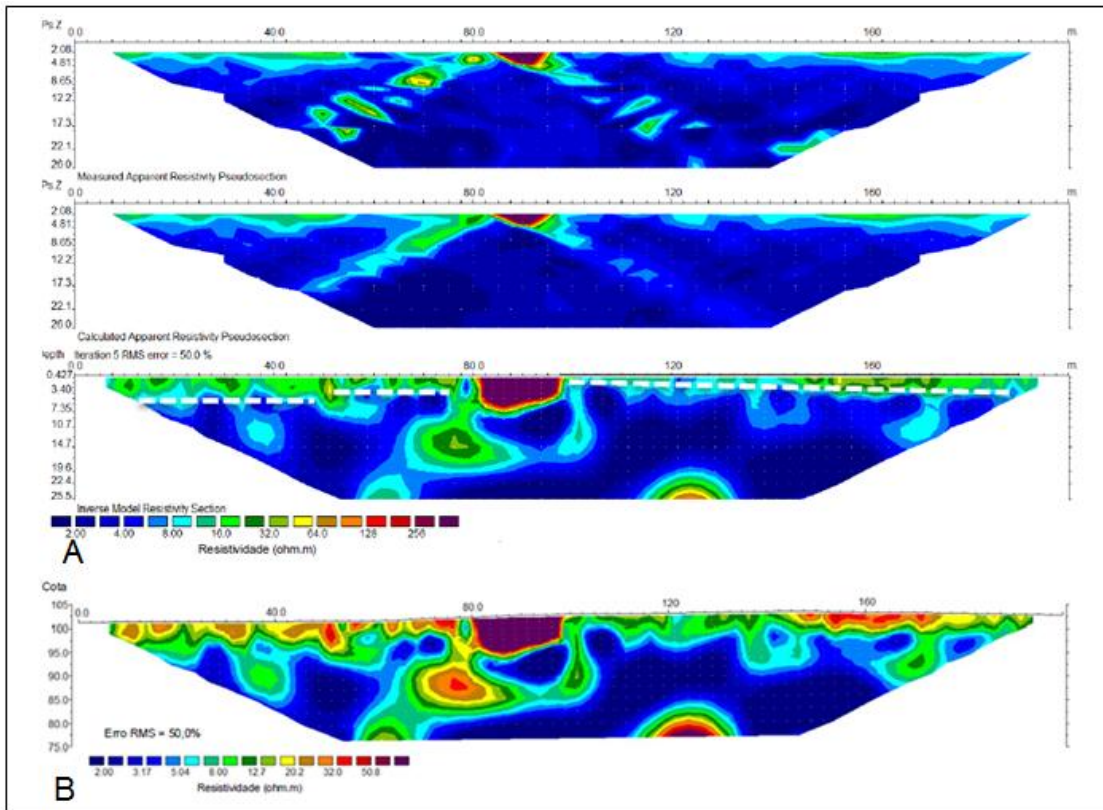


Figura 4.7 - Alinhamento PRE3. A - Do topo para a base, pseudo-seção das resistividades aparentes medidas no campo, pseudo-seção das resistividades aparentes calculadas e o modelo de resistividade elétrica para o dispositivo dipolo-dipolo, sem considerar a topografia. B - Modelo de Resistividade Elétrica para o dispositivo dipolo-dipolo, considerando a topografia.

Na Figura 4.7, são apresentados os dados medidos no campo, as resistividades elétricas aparentes calculadas e o modelo de resistividade elétrica para o dispositivo dipolo-dipolo quer considerando quer não considerando a topografia. O erro RMS obtido na aplicação deste ensaio foi de 50,0%, após 5 iterações e a profundidade máxima atingida foi de 25,5 m.

Analisando os resultados obtidos, é possível concluir que os valores de resistividade elétrica predominantes situam-se na gama dos azuis (entre 2,0 e 5,0 ohm.m). No entanto, observa-se uma zona que atinge sensivelmente os 10 m de profundidade, entre os 80 e os 120 m do alinhamento, onde os valores de resistividade elétrica são máximos (64,0 ohm.m).

Através dos resultados apresentados na Figura 4.7, conclui-se também, que a zona vadosa, limitada pela linha branca a tracejado, atinge 7 metros de profundidade, aproximadamente.

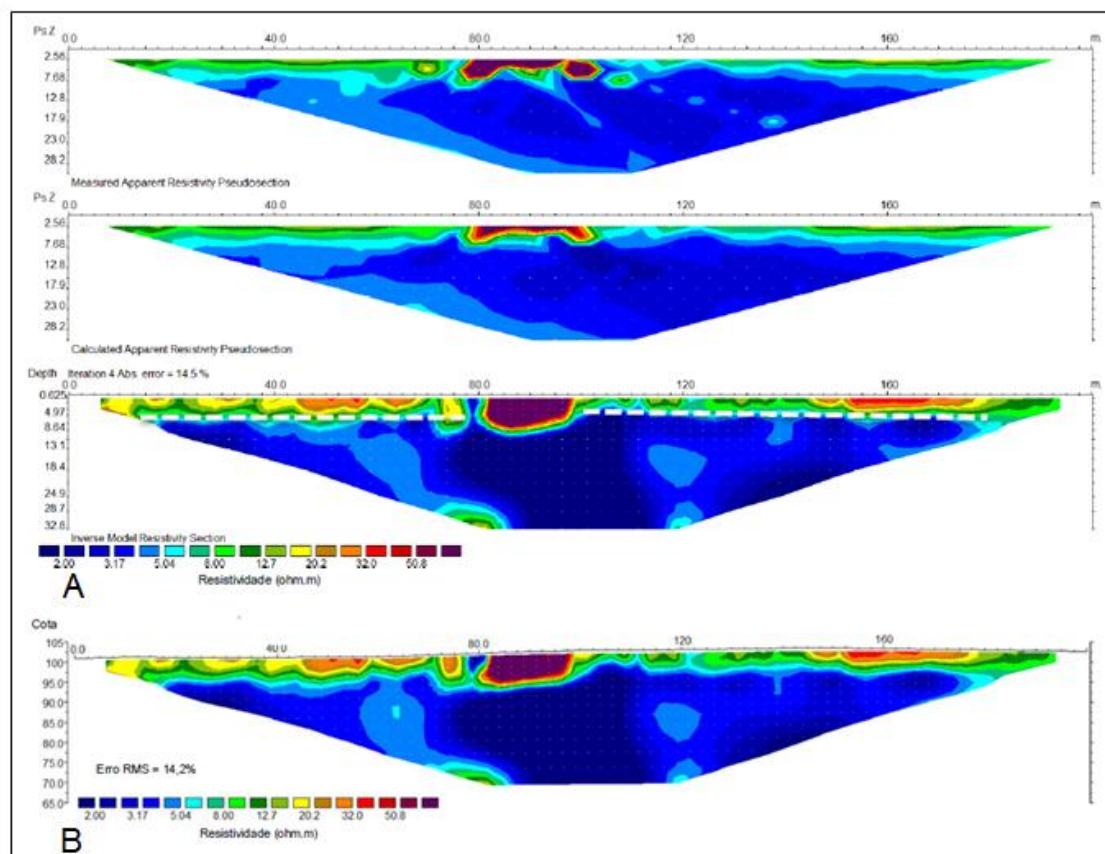


Figura 4.8 - Alinhamento PRE4. A - Do topo para a base, pseudo-seção das resistividades aparentes medidas no campo, pseudo-seção das resistividades aparentes calculadas e o modelo de resistividade elétrica para o dispositivo Wenner, sem considerar a topografia. B - Modelo de Resistividade Elétrica para o dispositivo Wenner, considerando a topografia.

A Figura 4.8, mostra os dados medidos no campo, as resistividades elétricas aparentes calculadas e o modelo de resistividade elétrica para o dispositivo Wenner quer considerando quer não considerando a topografia. O erro RMS obtido na aplicação deste ensaio foi de 14,2%, após 5 iterações, e a profundidade máxima atingida foi de 32,8 m.

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que as zonas que apresentam valores de resistividade elétrica acima dos 8,0 ohm.m predominam desde a superfície até próximo dos 8 m de profundidade, sendo este o limite máximo da zona vadosa, limitada pela linha branca a tracejado. Após os 8 m de profundidade prevalecem os valores na gama dos azuis, ou seja, entre 2,0 e 5,0 ohm.m, que correspondem aos valores de baixa resistividade elétrica.

Portanto, de uma forma geral, são os valores de baixa resistividade que apresentam maior representatividade neste modelo de resistividade elétrica para o dispositivo Wenner.

## 5. DISCUSSÃO - ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que os modelos de resistividade elétrica correspondentes ao dispositivo dipolo-dipolo apresentam maior variação lateral nos valores de resistividade elétrica. No entanto, é necessário considerar que as diferenças observadas entre os dois dispositivos utilizados resultam das características de cada um, ou seja, o dispositivo de Wenner possui boas condições para a leitura de potencial elétrico em meios de elevada heterogeneidade, por sua vez, o dispositivo dipolo-dipolo possui uma boa resolução lateral para as variações de resistividade elétrica (Lago, 2009; Mota, 2014).

Verifica-se também, que as profundidades de investigação atingidas na zona central de cada alinhamento foram superiores para o dispositivo Wenner. Comprovando-se ser esta uma das vantagens apresentadas para a aplicação do método de Wenner (Mota, 2014).

Relativamente, ao índice de qualidade, denominado erro RMS (*Root Mean Squared*), que corresponde à diferença entre os valores de resistividade medidos e os calculados, conclui-se que é inferior nos modelos apresentados para o dispositivo Wenner, podendo estar relacionado com o facto de este dispositivo possuir melhores condições para a leitura de potencial elétrico em meios heterogéneos (Santos, 2012 e Lago, 2009).

Os modelos apresentados correspondem à 4ª ou 5ª iteração, uma vez que o modelo a ser escolhido deve ser aquele que não apresenta variações significativas no erro RMS, relativamente ao obtido na iteração anterior (Lago, 2009).

De acordo com o relatório "Avaliação das condições para produção de biogás no aterro do Barlavento da ALGAR, com base no método da resistividade elétrica" elaborado pelo LNEC, o lixiviado produzido num aterro sanitário de RSU apresenta baixa resistividade elétrica, cerca de 3 ohm.m. Este facto sugere, através da análise às tomografias (modelos) de resistividade elétrica apresentadas na secção 4., que a massa de resíduos do aterro sanitário do Barlavento contém elevadas quantidades de lixiviado, levando à saturação da célula B.

Analisando, detalhadamente, as tomografias de resistividade elétrica, especula-se a existência de bolsas carregadas com lixiviado no interior da massa de resíduos, que devido à sua proximidade à superfície, podem ser investigadas através de perfurações efetuadas no topo da massa de resíduos. Esta técnica possibilita corroborar ou confirmar os resultados obtidos no ensaio de resistividade elétrica e, consequentemente, perceber o potencial da aplicação deste ensaio em situações similares.

Conclui-se, através da realização do ensaio geofísico de resistividade elétrica e dos modelos de resistividade elétrica apresentados para cada alinhamento, que as especulações realizadas inicialmente sobre a origem da diminuição da produção de biogás não são confirmadas pelos resultados obtidos. Uma vez que, os resultados sugerem que a massa de resíduos apresenta-se saturada em lixiviado e não com baixo teor de humidade, como foi especulado inicialmente, devido às características da localização geográfica do aterro.



No entanto, caso se verifique que os resultados obtidos pelo ensaio de resistividade elétrica correspondem à realidade, ou seja, que a massa de resíduos está saturada em lixiviado, esta situação tal como, a situação especulada de ausência de humidade, correspondem a condições extremas que não favorecem a atividade bacteriana e, consequentemente, a produção de biogás.

## 6. CAMPANHAS REALIZADAS

### 6.1. Primeira Campanha

#### 6.1.1. Célula B

##### a) Perfurações

Após análise dos resultados obtidos pela realização do ensaio geofísico de resistividade elétrica à célula B e, de estes sugerirem que a massa de resíduos estaria na sua maioria saturada em lixiviado, tentou-se proceder à verificação dos resultados obtidos.

Deste modo, nos dias 28 a 30 de Maio de 2014, fizeram-se três perfurações na célula B com o objetivo de analisar a veracidade dos resultados obtidos no ensaio geofísico. No entanto, para analisar os resultados obtidos nas perfurações considera-se necessário ter em atenção o desfasamento temporalmente entre o momento do ensaio geofísico, 18 e 19 de Fevereiro, e o momento da realização das perfurações, 28 e 30 de Maio. Isto porque a massa de resíduos está em constante alteração e as ações externas influenciam o comportamento do reator, que é a massa de resíduos.

As três perfurações foram efetuadas no alinhamento PRE2, uma vez que para testar a veracidade dos resultados este era o alinhamento mais propício para o efeito, dado que se situa no topo da célula B e os restantes alinhamentos foram efetuados sobre estrada ou sobre geomembrana, o que dificultou a logística das perfurações.

A metodologia para a escolha do local das três perfurações baseou-se nos resultados obtidos no ensaio de resistividade elétrica do alinhamento PRE2, ou seja, tentou-se delimitar uma área de estudo, de 50 m x 50 m, e escolher os locais em que a tomografia obtida apresentava menores valores de resistividade elétrica a menor profundidade e onde fosse possível realizar a perfuração, como se observa na Figura 6.1.

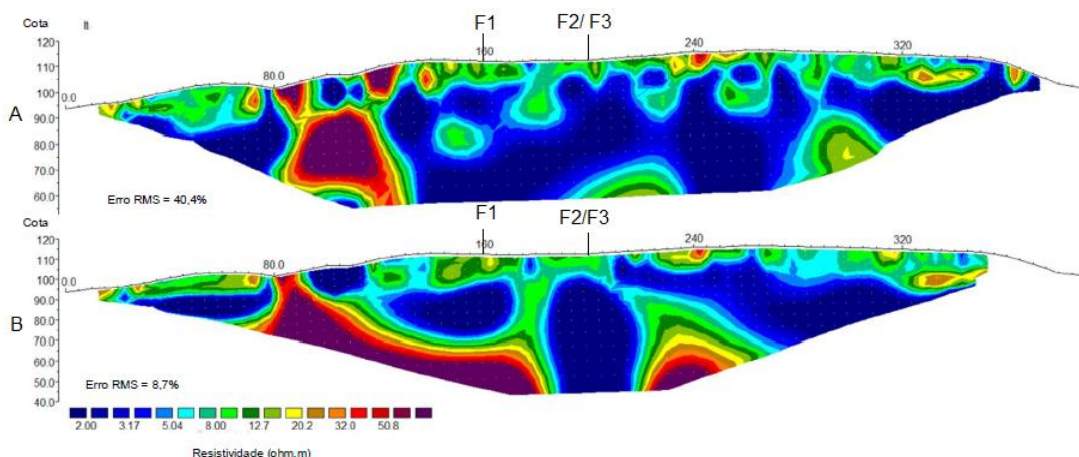


Figura 6.1 Marcação dos pontos de perfuração no alinhamento PRE2. A- Modelo de Resistividade Elétrica para o dispositivo dipolo-dipolo B- Modelo de Resistividade Elétrica para o dispositivo de Wenner

As perfurações foram realizadas com a maior precisão possível dado que no terreno encontraram-se algumas limitações nos locais definidos previamente, nomeadamente, devido à existência de drenos e da conduta de drenagem do biogás. Deste modo, realizaram-se as perfurações nas distâncias 160 e 200 m, aproximadamente, do alinhamento PRE2.

Relativamente à perfuração P1, esta efetuou-se à distância de 160 m num ponto à direita do alinhamento e as perfurações P2 e P3 efetuaram-se num ponto à direita e num ponto à esquerda, respetivamente, mas ambas na perpendicular que cruza o alinhamento PRE2 à distância de 200m e dentro da área de estudo (Figura 6.2).

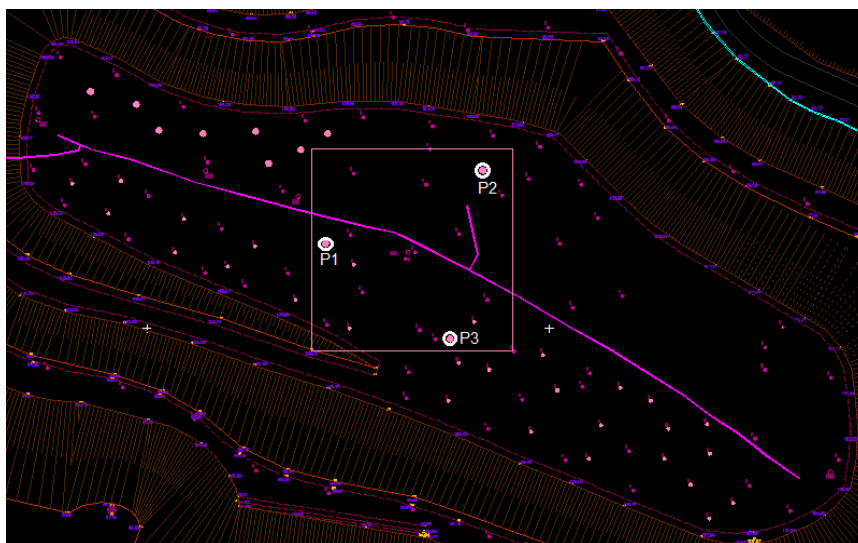


Figura 6.2 - Identificação dos novos poços de biogás (P1, P2 e P3)

O equipamento utilizado para a realização das perfurações foi um trado de 600, ou seja, com um diâmetro de 60 cm (Figura 6.3). Relativamente à profundidade atingida em cada perfuração o objetivo era de 18 m, ou seja, o máximo possível pelo equipamento existente. No entanto, verificou-se que a profundidade atingida está intimamente dependente das condições encontradas ao longo do trabalho realizado no campo, nomeadamente, pelo tipo de resíduos que vão sendo encontrados ao longo da perfuração. Deste modo, e considerando as dificuldades encontradas, as profundidades atingidas nas perfurações estão apresentadas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Profundidades atingidas nas perfurações no alinhamento PRE2

Furação	Profundidade (m)
P1	14
P2	16
P3	17



Figura 6.3 - Equipamento utilizado (Trado de 600) (Foto tirada em 29/05/2014 por Ana Silva)

Na perfuração P1, a profundidade atingida foi de 14 m e observou-se a presença de lamas, aproximadamente, a 12 m (Figura 6.4). De acordo com os resultados obtidos, na zona do P1 os valores de resistividade, que correspondem à presença de lixiviado ( $<5 \text{ ohm.m}$ ), encontram-se a partir dos 11 - 14 m, conforme o dispositivo utilizado (Dipolo-dipolo ou Wenner). Relacionando os resultados obtidos na perfuração com os do ensaio, considerou-se que estes podem ter sido influenciados pela presença das lamas.



Figura 6.4 - Perfuração P1 (Foto tirada em 30/05/2014 pelo Eng.º Valter Ferreira)

Na perfuração P2, a profundidade atingida de 16 m revelou que a massa de resíduos não se encontrava saturada em lixiviado (Figura 6.5). Estes resultados revelaram-se contraditórios, uma vez que os resultados do ensaio geofísico apresentaram baixos valores de resistividade elétrica, correspondentes à presença de lixiviado, a cerca de 7 m de profundidade.

Deste modo, o que se observou na furação foi que a massa de resíduos possuía algum teor de humidade (cerca de 40%, em observação direta), sugerindo ser o ideal para a atividade bacteriana e, respetiva, produção de biogás, e não escassez ou excesso de humidade.



Figura 6.5 - Perfuração P2 (Foto tirada em 29/05/2014 por Ana Silva)

Na perfuração P3, a profundidade atingida foi de 17 m, observando-se também a presença de lamas mas, desta vez a 8 m de profundidade, aproximadamente (Figura 6.6). Analisando os resultados obtidos, observa-se que na zona do P3 os valores de resistividade, que correspondem à presença de lixiviado ( $<5 \text{ ohm.m}$ ), encontram-se a partir dos 7 - 11 m, aproximadamente, de acordo com o dispositivo utilizado, Dipolo-dipolo ou Wenner. Este facto pode significar que as lamas encontradas na perfuração influenciaram os resultados obtidos no ensaio realizado de resistividade elétrica.



Figura 6.6 - Perfuração P3 (Foto tirada em 30/05/2014 pelo Eng.º Valter Ferreira)

Após a realização das perfurações e, por comparação com os resultados obtidos no ensaio de resistividade elétrica na célula B do aterro sanitário de Barlavento, foi possível verificar que os resultados obtidos não correspondem à realidade detetada na massa de resíduos, ou seja, esta não se encontra saturada em lixiviado como os resultados sugeriam.

Relativamente às lamas observadas nas perfurações, estas podem conduzir a baixos valores de resistividade elétrica, uma vez que se desconhece a sua origem e podendo elas serem constituídas por argilas, que apresentam valores de resistividade numa gama entre 1 e  $10^2 \text{ ohm.m}$ , de acordo com Laureano (2007). Para além disso, as argilas tendem a adsorver os



iões produzidos na degradação dos resíduos, nomeadamente, níquel (Ni), chumbo (Pb) e zinco (Zn), e são estes os principais constituintes do lixiviado responsáveis pela condução elétrica, ou seja, são os menos resistentes à passagem de corrente elétrica (Laureano, 2007).

- Monitorização dos novos drenos de biogás

Após a realização das perfurações, cada perfuração foi cheia com brita e entubada com tubo de 200 mm de 3,5 m (Figura 6.7 e Figura 6.8), para deste modo poderem ser utilizadas como poços de biogás.



Figura 6.7 - Colocação de brita nas perfurações (Foto tirada em 30/05/2014 pelo Eng.º Valter Ferreira)



Figura 6.8 - Dreno de biogás (Foto tirada em 25/05/2014 por Ana Silva)

Após a conclusão dos três novos drenos foram efetuadas medições de biogás, tendo-se voltado a repetir as medições cerca de três semana depois, com o objetivo de avaliar o comportamento dos novos drenos de biogás. Os resultados obtidos em cada medição estão todos apresentados na Tabela 6.2 e na Figura 6.9, Figura 6.10 e Figura 6.11 para cada poço e para cada componente.

Tabela 6.2 - Medições de biogás nos três novos drenos P1, P2 e P3 (03/06/2014 e 26/06/2014)

		<b>P1</b>	
		<b>03-06-2014</b>	<b>26-06-2014</b>
<b>Biogás</b>	CH <sub>4</sub> (%)	48,0	54,5
	CO <sub>2</sub> (%)	34,5	37,8
	O <sub>2</sub> (%)	1,5	1,2
	Outros (%)	16,0	6,5
		<b>P2</b>	
		<b>03-06-2014</b>	<b>26-06-2014</b>
<b>Biogás</b>	CH <sub>4</sub> (%)	53,6	53,2
	CO <sub>2</sub> (%)	31,7	35,3
	O <sub>2</sub> (%)	0,9	1,8
	Outros (%)	13,8	9,7
		<b>P3</b>	
		<b>03-06-2014</b>	<b>26-06-2014</b>
<b>Biogás</b>	CH <sub>4</sub> (%)	52,8	51,1
	CO <sub>2</sub> (%)	34,2	36,9
	O <sub>2</sub> (%)	1,2	1,6
	Outros (%)	11,8	10,4

Nos resultados obtidos nas medições efetuadas, verifica-se que apenas o poço P1 sofreu um ligeiro aumento na percentagem de metano (CH<sub>4</sub>), de 48% para 54,5% (Figura 6.9 A), pelo que nos restantes verificou-se uma diminuição ligeira (Figura 6.10 A e Figura 6.11 A). No entanto, também se constata que no momento da segunda medição nenhum poço possuía valores de metano (CH<sub>4</sub>) inferiores a 50% (Figura 6.9 A, Figura 6.10 A e Figura 6.11 A). Este é um fator positivo, uma vez que a percentagem de metano é determinante na qualidade e no aproveitamento energético do biogás e, segundo a bibliografia, estes valores são característicos da fase de metanogénese, fase em que é atingida o pico de produção de biogás.

Relativamente aos valores de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (Figura 6.9 B, Figura 6.10 B e Figura 6.11 B), estes são inferiores a 40% em todos os poços (P1, P2 e P3), no entanto verifica-se um aumento destes valores da primeira para a segunda medição do biogás. Os valores registados do dióxido de carbono podem ser um indicador de que a massa de resíduos não se encontra na fase de metanogénese, mas sim no início da fase seguinte, isto é, no início da fase de transição, em que os valores de CO<sub>2</sub> sofrem um decréscimo para valores inferiores a 40%.

Através dos valores obtidos, verifica-se que os correspondentes ao oxigénio (O<sub>2</sub>) encontram-se acima de 1%, exceto na primeira medição efetuada no poço P2 (Figura 6.10 C). Estes valores são importantes dado que o processo de produção de biogás é anaeróbio e a presença de oxigénio pode afetar o processo. Também, se verifica que os valores de O<sub>2</sub> tendem a diminuir, quando os valores de metano (CH<sub>4</sub>) aumentam, e o contrário também se observa, ou seja, quando os valores de CH<sub>4</sub> diminuem, o oxigénio (O<sub>2</sub>) presente aumenta.

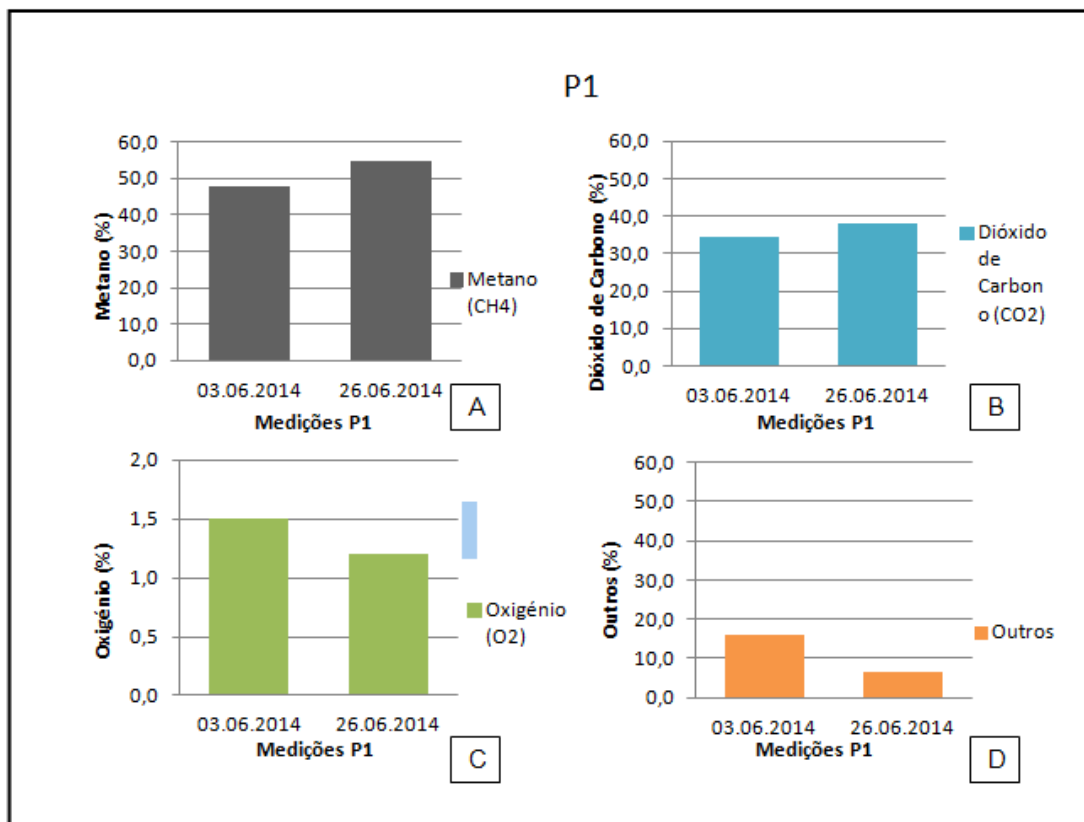


Figura 6.9 - Medições do biogás na 1ª campanha no poço P1. A- Percentagem de metano (CH<sub>4</sub>). B- Percentagem de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). C- Percentagem de oxigénio (O<sub>2</sub>). D- Percentagem de outros gases

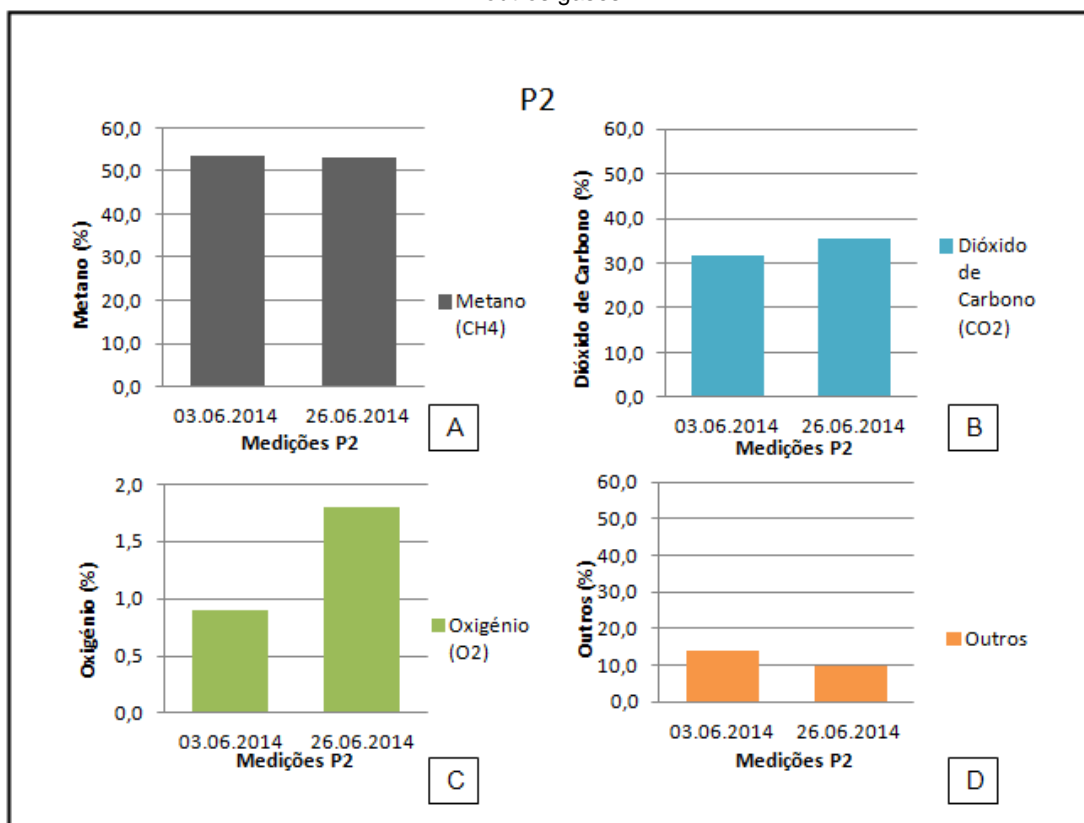


Figura 6.10 - Medições do biogás na 1ª campanha no poço P2. A- Percentagem de metano (CH<sub>4</sub>). B- Percentagem de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). C- Percentagem de oxigénio (O<sub>2</sub>). D- Percentagem de outros gases



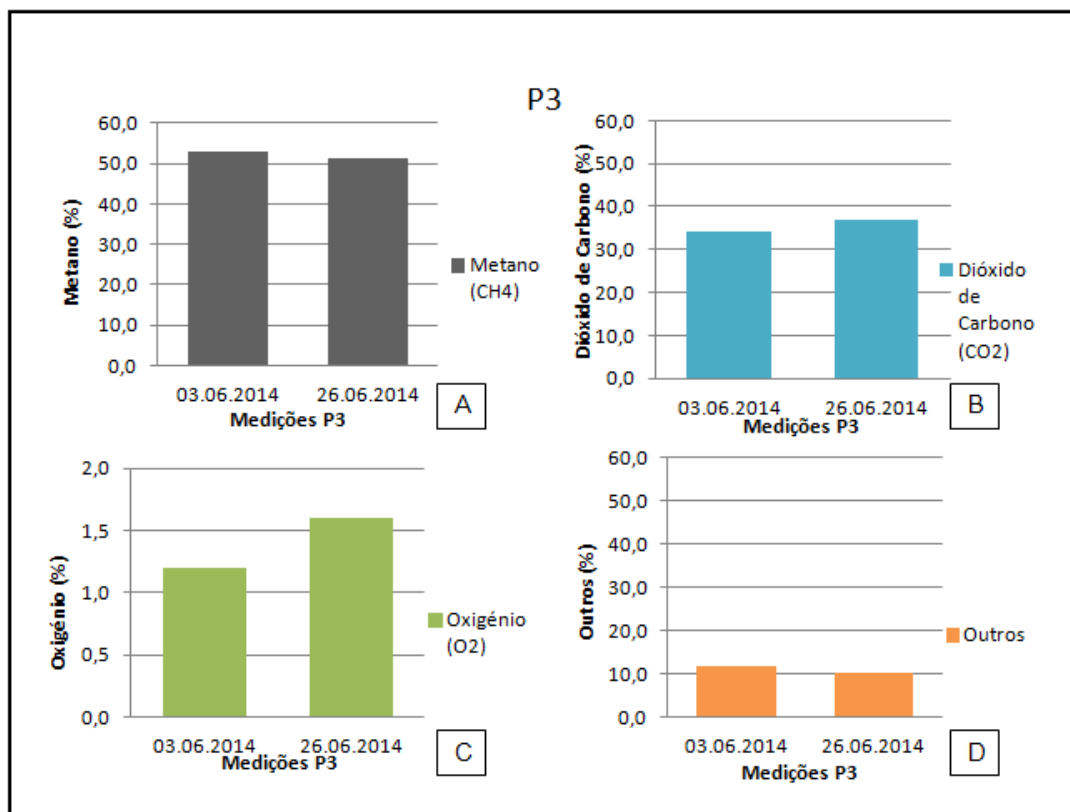


Figura 6.11 - Medições do biogás na 1ª campanha no poço P3. A- Percentagem de metano (CH<sub>4</sub>). B- Percentagem de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). C- Percentagem de oxigênio (O<sub>2</sub>). D- Percentagem de outros gases

### 6.1.2. Célula C

Os trabalhos realizados na célula C, célula em que inicialmente não estava contemplada nenhuma intervenção, serviram para aplicação de um ensaio teste, que se considerou ser de elevada importância dado o desenvolvimento dos resultados obtidos, ou seja, a não confirmação dos resultados do ensaio de resistividade elétrica e as medições efetuadas nos novos poços não serem conclusivas por si só.

Na aplicação deste ensaio teste começou-se por proceder à abertura de duas valas na massa de resíduos na célula C, de dimensões variáveis, na zona assinalada na Figura 6.12. Após a sua abertura, as valas foram inundadas com água lixiviante, com o objetivo de aumentar o teor de humidade na massa de resíduos nas áreas de influência das respetivas valas.

Após o procedimento de inundação das valas determinaram-se quais os poços sobre os quais se iria realizar a monitorização do biogás. Estes poços - P8, P10 e P11 - estão assinalados na Figura 6.12.

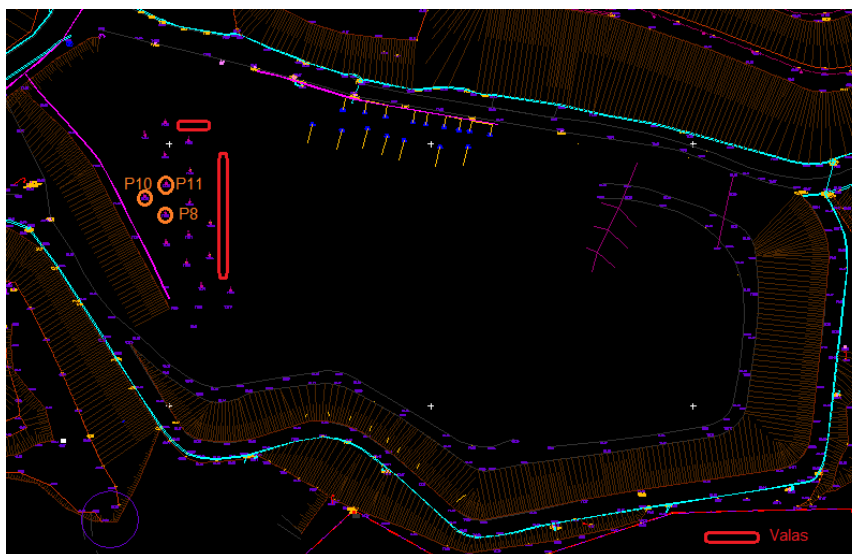


Figura 6.12 - Identificação das zonas das valas e dos poços de biogás monitorizados

A primeira fase de monitorização desta campanha realizou-se logo após os trabalhos no campo estarem concluídos, isto é, após a inundação das valas. Nesta fase, para além do biogás, também se monitorizou o nível piezométrico nos três poços assinalados na Figura 6.12. Na Tabela 6.3, estão apresentados os resultados para a monitorização do nível piezométrico e do biogás, em 03/06/2014 e em 27/06/2014. Os valores apresentados na tabela, são complementados pela Figura 6.13, Figura 6.15 e Figura 6.14.

Tabela 6.3 - Resultados de 1ª campanha das medições do nível piezométrico e do biogás nos poços P8, P10 e P11 (03/06/2014 e 27/06/2014)

		Poço 8	
		03/06/2014	27/06/2014
Nível Piezométrico	(m)	3,5	6
Biogás	CH <sub>4</sub> (%)	15,0	58,2
	CO <sub>2</sub> (%)	5,8	35,2
	O <sub>2</sub> (%)	10,3	1,2
	Outros (%)	68,9	5,4
		Poço 10	
		03/06/2014	27/06/2014
Nível Piezométrico	(m)	3,5	6,6
Biogás	CH <sub>4</sub> (%)	26,3	38,4
	CO <sub>2</sub> (%)	17,3	24,2
	O <sub>2</sub> (%)	9,8	6,9
	Outros (%)	46,6	30,5
		Poço 11	
		03/06/2014	27/06/2014
Nível Piezométrico	(m)	3,5	5
Biogás	CH <sub>4</sub> (%)	19,3	59,4
	CO <sub>2</sub> (%)	16	33,9
	O <sub>2</sub> (%)	10,4	1
	Outros (%)	54,3	5,7

De forma expedita, constata-se que os valores de metano ( $\text{CH}_4$ ) aumentaram significativamente da primeira para a segunda medição nos três poços (Figura 6.13 A, Figura 6.14 A e Figura 6.15 A). Este aumento foi acompanhado pelo aumento do nível piezométrico (diminuição do nível de lixiviado na massa de resíduos).

Relativamente ao dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), este também aumentou, já o oxigénio ( $\text{O}_2$ ) diminuiu, e em grande escala, nomeadamente no P8 (Figura 6.13 C) e no P11 (Figura 6.15 C).

As diferenças entre as primeiras e as segundas medições são muito significativas nos poços P8 (Figura 6.13) e P11 (Figura 6.15), no entanto e, apesar de não ser tão significativa, o poço P10 (Figura 6.14) também sofreu uma melhoria nos níveis de metano, dióxido de carbono e oxigénio. Esta melhoria proporcionou a diminuição da percentagem da componente "outros", que corresponde aos restantes constituintes do biogás.

Pelos resultados obtidos, conclui-se que o aumento do nível piezométrico foi acompanhado pela melhoria na qualidade do biogás. Permitindo, constatar que os poços de biogás não respondem bem quando a massa de resíduos está saturada em lixiviado, mas melhoram significativamente, com a humidade que se mantém, após a drenagem da água lixiviante.

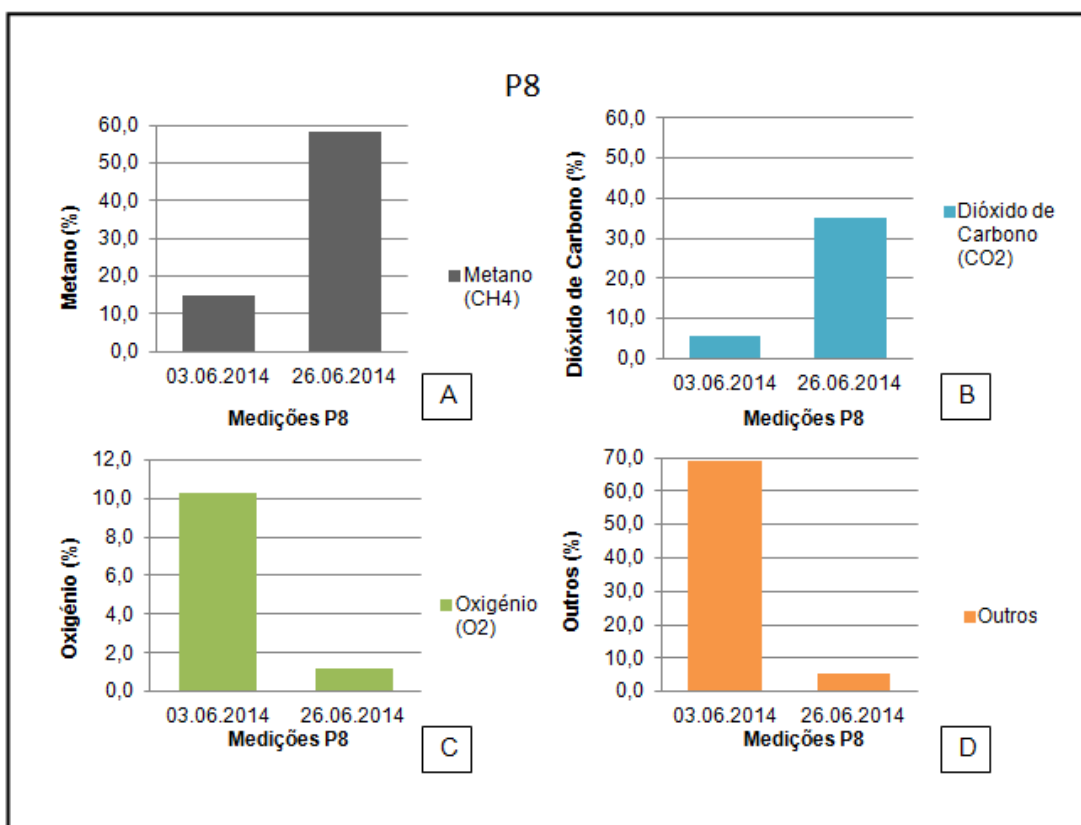


Figura 6.13 - Medições do biogás na 1ª campanha no poço P8. A- Percentagem de metano ( $\text{CH}_4$ ). B- Percentagem de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). C- Percentagem de oxigénio ( $\text{O}_2$ ). D- Percentagem de outros gases

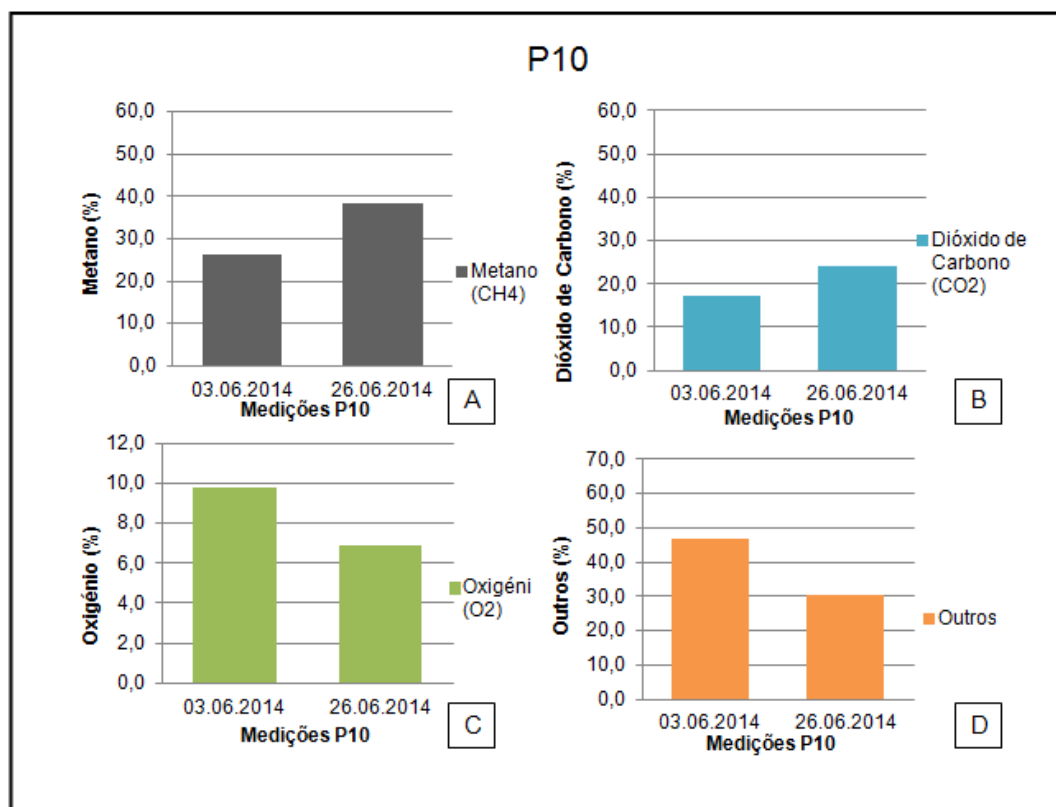


Figura 6.14 - Medições do biogás na 1ª campanha no poço P10. A- Percentagem de metano (CH<sub>4</sub>). B- Percentagem de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). C- Percentagem de oxigénio (O<sub>2</sub>). D- Percentagem de outros gases

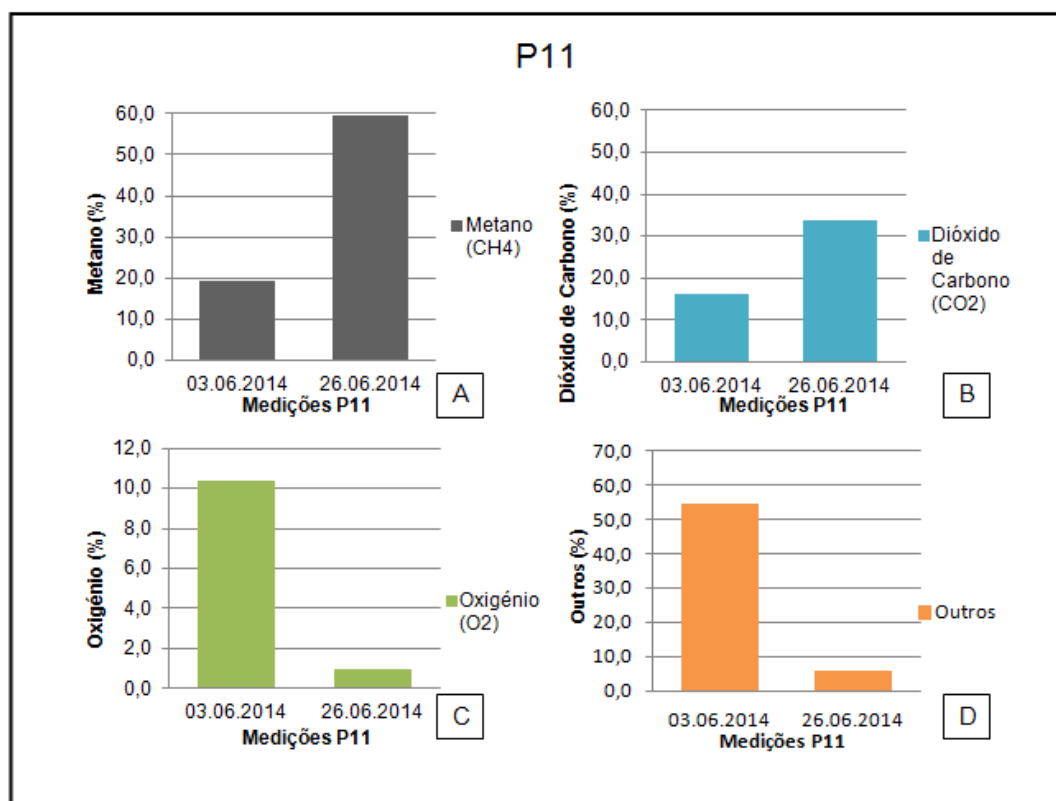


Figura 6.15 - Medições do biogás na 1ª campanha no poço P11. A- Percentagem de metano (CH<sub>4</sub>). B- Percentagem de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). C- Percentagem de oxigénio (O<sub>2</sub>). D- Percentagem de outros gases

## 6.2. Segunda Campanha

### 6.2.1. Célula B

A segunda campanha na célula B realizou-se nos dias 16 e 17 de Julho de 2014 e, teve como principal objetivo continuar os trabalhos de monitorização sobre os novos poços de biogás (P1, P2 e P3), para desta forma avaliar continuamente o comportamento dos mesmos. Posteriormente poder-se-á comparar os resultados obtidos nesta campanha com os obtidos na primeira campanha realizada.

Nesta campanha as medições de biogás nos poços P1, P2 e P3 foram repetidas mais vezes, para assim existir uma maior representatividade e certeza associada aos valores obtidos na monitorização. Desta forma, realizaram-se duas medições no período da manhã e duas medições no período da tarde, nos dias 16 e 17 de Julho, cujos resultados obtidos são apresentados na Tabela 6.4 e apoiados pelos gráficos da Figura 6.16, Figura 6.17 e Figura 6.18.

Tabela 6.4 - Resultados da 2ª campanha das medições de biogás nos drenos P1, P2 e P3 (16/07/2014 e 17/07/2014)

		P1							
		16-07-2014				17-07-2014			
		Manhã		Tarde		Manhã		Tarde	
Biogás	CH <sub>4</sub> (%)	52,8	49,1	44,7	50,2	58,5	57,7	57,5	57,4
	CO <sub>2</sub> (%)	35,3	33,8	33,1	35,6	37,2	36,9	36,5	34,1
	O <sub>2</sub> (%)	2,2	2,7	2,6	1,4	1,1	1,1	1,2	0,8
	Outros (%)	9,7	14,4	19,6	12,8	3,2	4,3	4,8	7,7
		P2							
		16-07-2014				17-07-2014			
		Manhã		Tarde		Manhã		Tarde	
Biogás	CH <sub>4</sub> (%)	51,8	50,6	48,7	52,4	57,7	57,3	56,2	56,6
	CO <sub>2</sub> (%)	34,0	34,3	33,6	35,4	37,2	36,9	35,1	34,0
	O <sub>2</sub> (%)	3,4	2,5	2,6	1,6	1,1	1,1	1,2	1,0
	Outros (%)	10,8	12,6	15,1	10,6	4,0	4,7	7,5	8,4
		P3							
		16-07-2014				17-07-2014			
		Manhã		Tarde		Manhã		Tarde	
Biogás	CH <sub>4</sub> (%)	46,0	50,4	45,9	36,4	58,6	59,0	57,1	56,6
	CO <sub>2</sub> (%)	33,4	36,6	33,9	29,5	37,4	37,6	34,8	33,2
	O <sub>2</sub> (%)	3,3	1,9	2,6	3,9	0,9	0,8	0,9	0,8
	Outros (%)	17,3	11,1	17,6	30,2	3,1	2,6	7,2	9,4

Os poços P1 (Figura 6.16 A), P2 (Figura 6.17 A) e P3 P3 (Figura 6.18 A) no 1º dia de monitorização, dia 16 de Julho, apresentaram valores de CH<sub>4</sub> instáveis ao longo das medições efetuadas e alguns desses valores, abaixo dos 50%. No 2º dia de monitorização, ao contrário

do 1º, os valores apresentaram-se relativamente constantes, acima dos 50%, pelo que se conclui que ocorreu uma melhoria significativa na qualidade do biogás.

Observa-se, também, que os valores de biogás de uma forma geral tendem a ter maior qualidade nas medições efetuadas no dia 17 de Julho. Para além do metano ( $\text{CH}_4$ ) apresentar valores acima dos 50%, o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) apresenta valores entre os 33% e os 38% e os valores de oxigénio encontram-se no 1%, aproximadamente.

Relativamente ao oxigénio ( $\text{O}_2$ ), destaca-se a sua variação ao longo das medições, uma vez que é perceptível a diminuição da percentagem de oxigénio presente no biogás, com o aumento da percentagem de metano, por exemplo, no poço P2 (Figura 6.17 A e C), nas primeiras medições (M1) efetuadas nos dias de monitorização, o metano apresentou uma variação cerca de 6% (51,8% para 57,7%) e o oxigénio uma diminuição de 3,4% para 1,1%.

Verifica-se, assim, como a percentagem de metano aumentou do primeiro para o segundo dia de monitorização, a percentagem de oxigénio diminuiu. Deste modo, salienta-se que a monitorização do biogás tem como focos principais o teor em metano e o teor em oxigénio, uma vez que o metano é determinante à qualidade e funcionamento dos motores de biogás e o oxigénio condiciona todo o processo de formação de biogás, uma vez que este ocorre idealmente em condições anaeróbias.

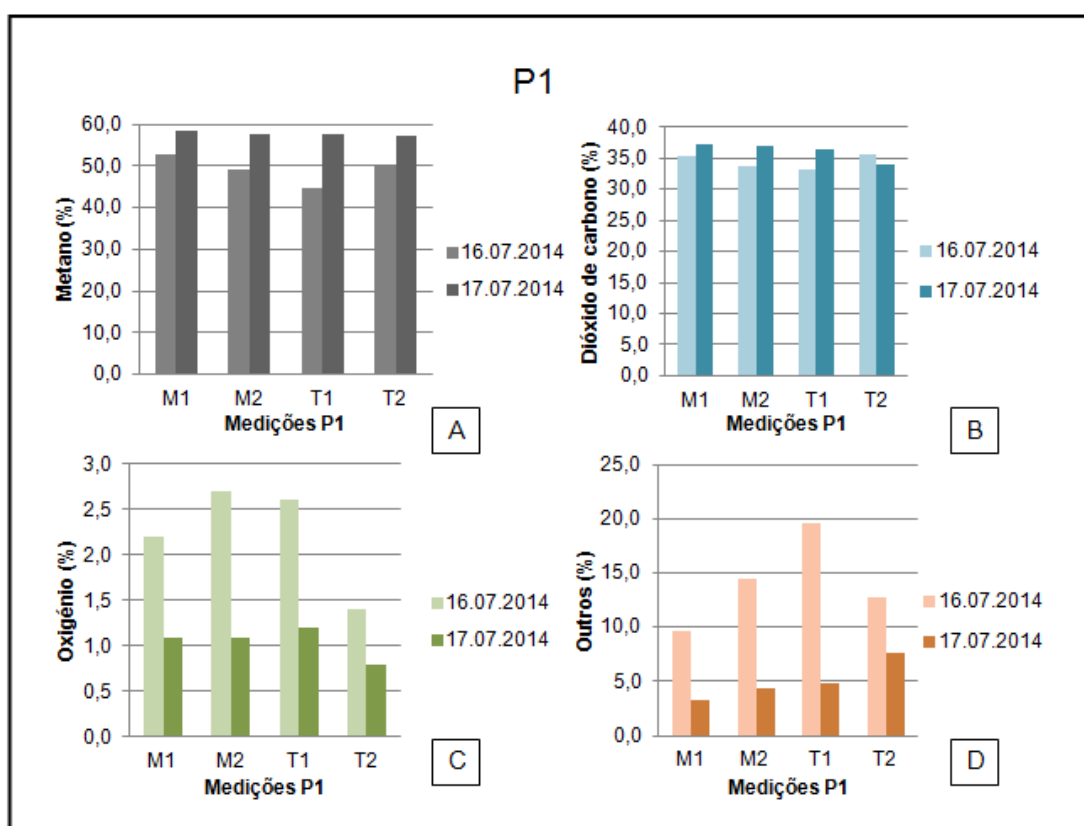


Figura 6.16 - Medições do biogás na 2ª campanha no poço P1. A- Percentagem de metano ( $\text{CH}_4$ ). B- Percentagem de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). C- Percentagem de oxigénio ( $\text{O}_2$ ). D- Percentagem de outros gases

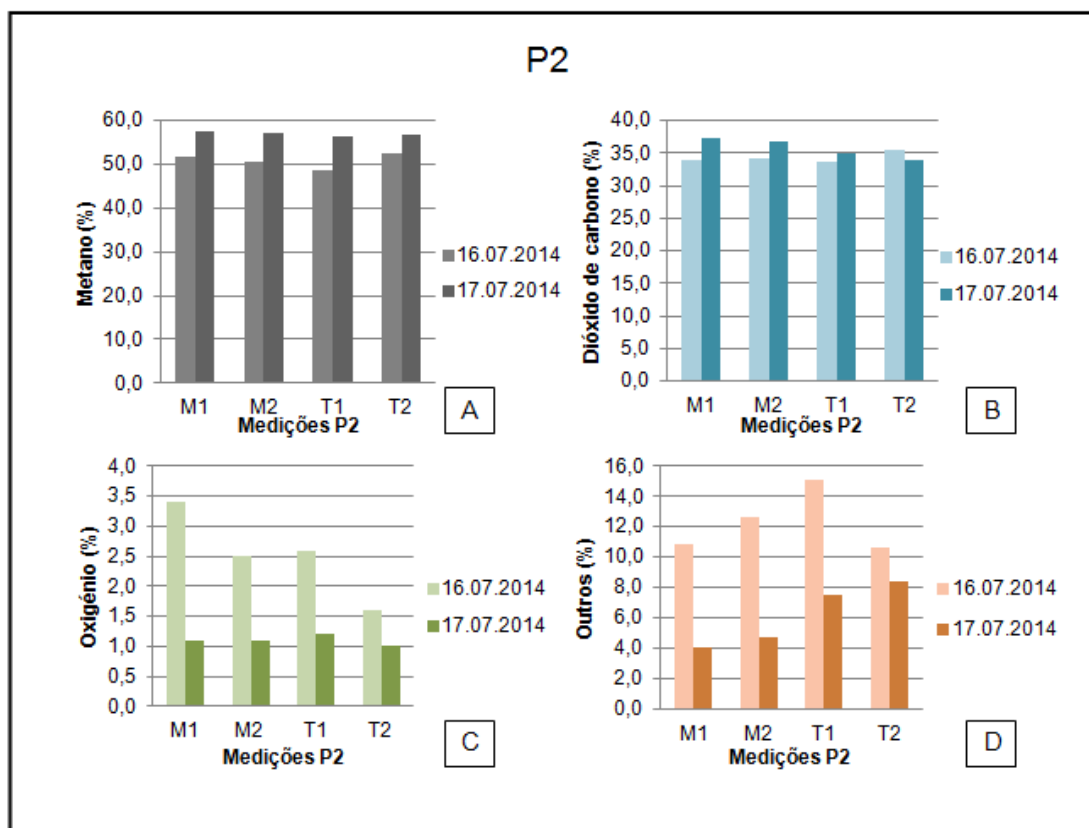


Figura 6.17 - Medições do biogás na 2ª campanha no poço P2. A- Percentagem de metano ( $\text{CH}_4$ ). B- Percentagem de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). C- Percentagem de oxigénio ( $\text{O}_2$ ). D- Percentagem de outros gases

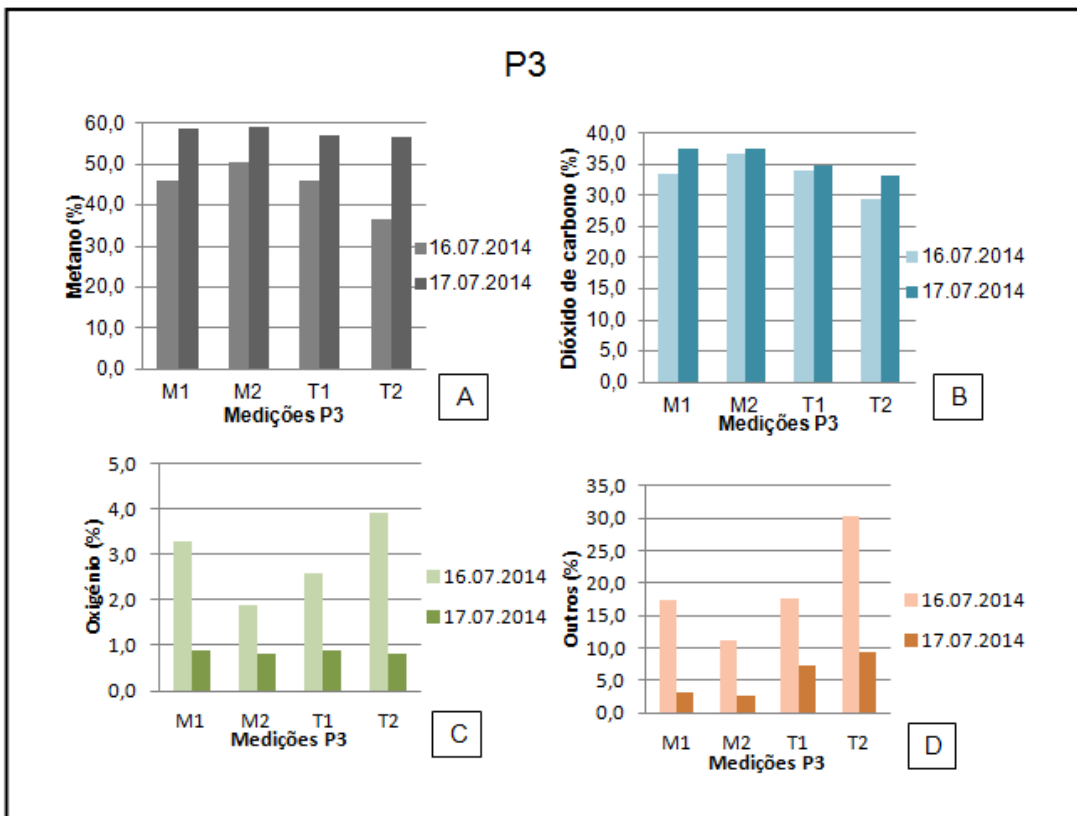


Figura 6.18 - Medições do biogás na 2ª campanha no poço P3. A- Percentagem de metano ( $\text{CH}_4$ ). B- Percentagem de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). C- Percentagem de oxigénio ( $\text{O}_2$ ). D- Percentagem de outros gases

Os gráficos da Figura 6.19, da Figura 6.20 e da Figura 6.21 mostram os valores médios diários percentuais obtidos pela monitorização dos poços de biogás (P1, P2 e P3) na 2ª campanha. Ao observar os gráficos, verifica-se uma melhoria nos valores médios do biogás do primeiro para o segundo dia de monitorização. Esta melhoria deve-se, principalmente, ao aumento da percentagem de metano ( $\text{CH}_4$ ) e à diminuição da percentagem de oxigénio ( $\text{O}_2$ ) presente na composição do biogás.

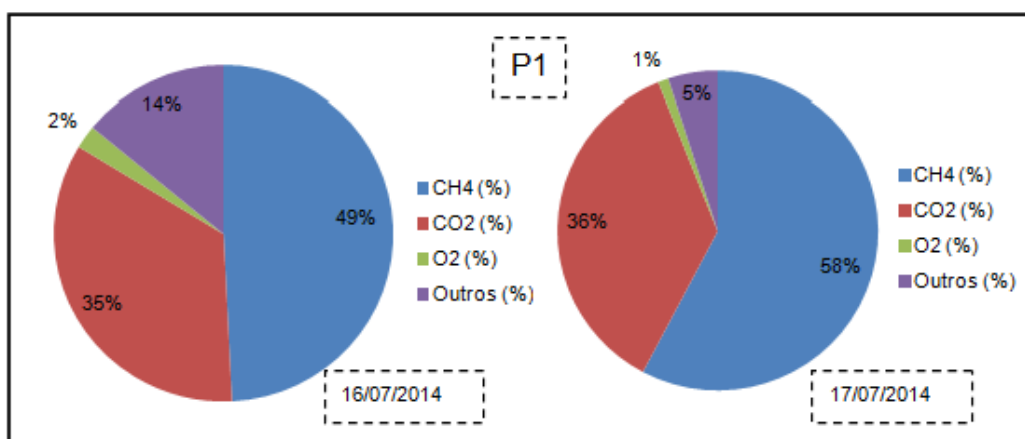


Figura 6.19 - Valores médios diários percentuais da monitorização do poço P1 nos dias 16/07/2014 e 17/07/2014

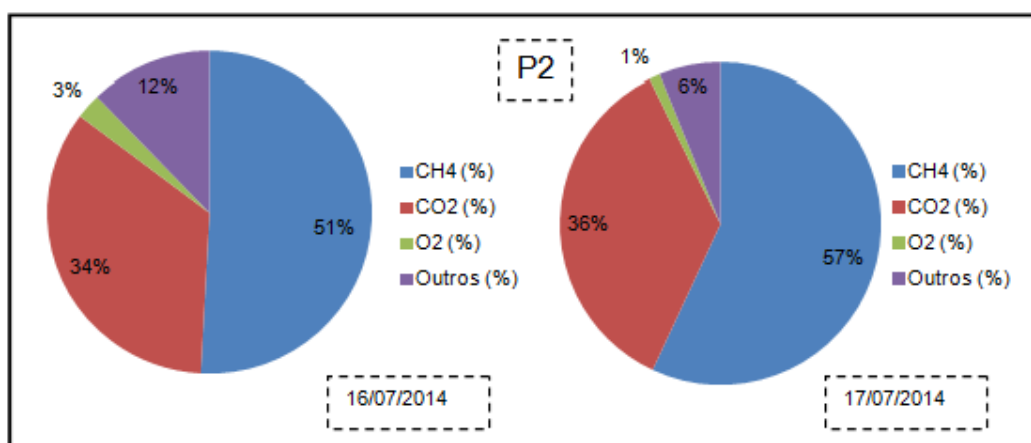


Figura 6.20 - Valores médios diários percentuais da monitorização do poço P2 nos dias 16/07/2014 e 17/07/2014

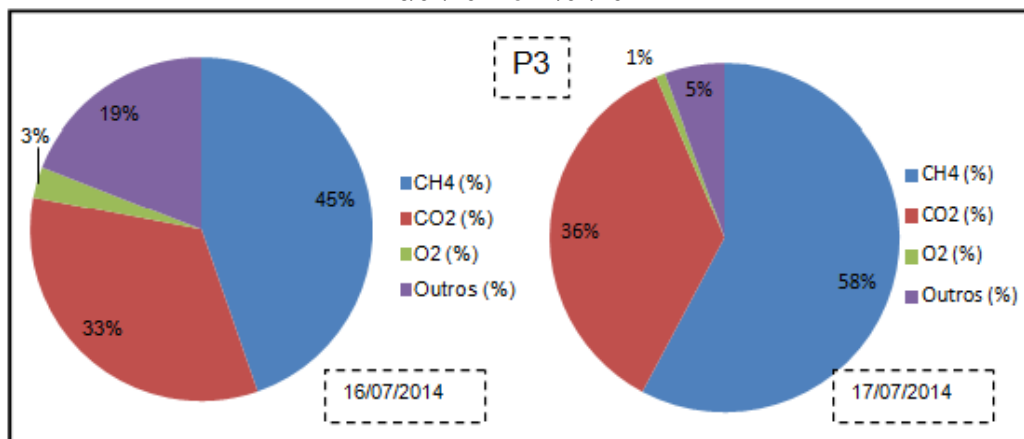


Figura 6.21 - Valores médios diários percentuais da monitorização do poço P3 nos dias 16/07/2014 e 17/07/2014



### 6.2.2. Célula C

Relativamente aos trabalhos realizados na célula C para a segunda campanha, estes consistiram na execução de três valas (Figura 6.22 e Figura 6.23), com dimensões de 1,5 a 2,0 m x 1,0 m x comprimento variável, no dia 14 de Julho, de forma a criar uma zona drenante à volta de cada um dos drenos (P8, P10 e P11).

Após a execução das valas, montou-se um sistema de bombagem de forma a encher as valas com água lixiviante e a possibilitar recarrega-las todos os dias durante um período da manhã e um período da tarde, até ao dia 17 de Julho.



Figura 6.22 - Vala executada junto ao dreno P10 (Foto tirada por Ana Silva a 16/07/2014)



Figura 6.23 - Valas executadas em volta dos drenos P8, P10 e P11 (Foto tirada por Ana Silva a 17/07/2014)

Enquanto decorreu o processo de recarregar as valas executadas à volta dos drenos P8, P10 e P11, efetuaram-se medições de biogás nos últimos dois dias (16 e 17 de Julho). Pelo que estes valores foram registados e estão apresentados na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 - Resultados da 2ª campanha das medições de biogás nos drenos P8, P10 e P11 (16/07/2014 e 17/07/2014)

		P8							
		16-07-2014				17-07-2014			
		Manhã		Tarde		Manhã		Tarde	
Biogás	CH <sub>4</sub> (%)	25,5	25,4	51,0	47,0	57,4	57,1	56,7	56,9
	CO <sub>2</sub> (%)	16,3	16,4	31,0	28,5	36,6	36,8	34,4	34,8
	O <sub>2</sub> (%)	10,0	10,4	3,2	3,0	1,2	1,3	1,1	0,9
	Outros (%)	48,2	47,8	14,8	21,5	4,8	4,8	7,8	7,4
		P10							
		16-07-2014				17-07-2014			
		Manhã		Tarde		Manhã		Tarde	
Biogás	CH <sub>4</sub> (%)	20,3	20,1	33,2	47,2	57,6	57,6	56,6	57,3
	CO <sub>2</sub> (%)	12,2	12,0	25,1	30,4	36,5	37,1	34,5	35,2
	O <sub>2</sub> (%)	12,1	12,2	6,4	2,6	1,1	1,0	1,1	0,9
	Outros (%)	55,4	55,7	35,3	19,8	4,8	4,3	7,8	6,6
		P11							
		16-07-2014				17-07-2014			
		Manhã		Tarde		Manhã		Tarde	
Biogás	CH <sub>4</sub> (%)	14,0	13,6	12,4	9,5	57,4	57,6	56,6	56,9
	CO <sub>2</sub> (%)	8,3	8,2	8,4	8,4	36,8	37,1	34,7	35,3
	O <sub>2</sub> (%)	14,1	14,0	13,4	13,6	1,1	1,0	1,1	1,0
	Outros (%)	63,6	64,2	65,8	68,5	4,7	4,3	7,6	6,8

Ao analisar os resultados obtidos na 2ª campanha, relativamente às ações realizadas na célula C, ou seja, da execução de valas em volta dos poços e respetivo enchimento/recarregamento com água lixiviante, verificou-se que nas medições efetuadas nos três poços (P8, P10 e P11) no dia 16 de Julho a qualidade do biogás foi muito baixa, uma vez que apresentavam para todos os poços baixa percentagem de metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e elevada percentagem de oxigénio (O<sub>2</sub>) e outros gases, como se observa nos gráficos da Figura 6.24, da Figura 6.25 e da Figura 6.26.

No entanto, ao observar os valores obtidos nas medições efetuadas no dia 17 de Julho e os gráficos de Figura 6.24, da Figura 6.25 e da Figura 6.26, estes revelaram significativa melhoria na qualidade do biogás, isto é, os valores de metano (CH<sub>4</sub>) estavam acima dos 50%, os valores correspondentes ao dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) entre os 34% e os 38% e os valores de oxigénio estavam, aproximadamente, no 1%.

Esta melhoria significativa da qualidade de biogás nos poços P8 (Figura 6.24), P10 (Figura 6.25) e P11 (Figura 6.26), assume-se que esteja associada ao recarregamento das valas executadas em volta dos poços.

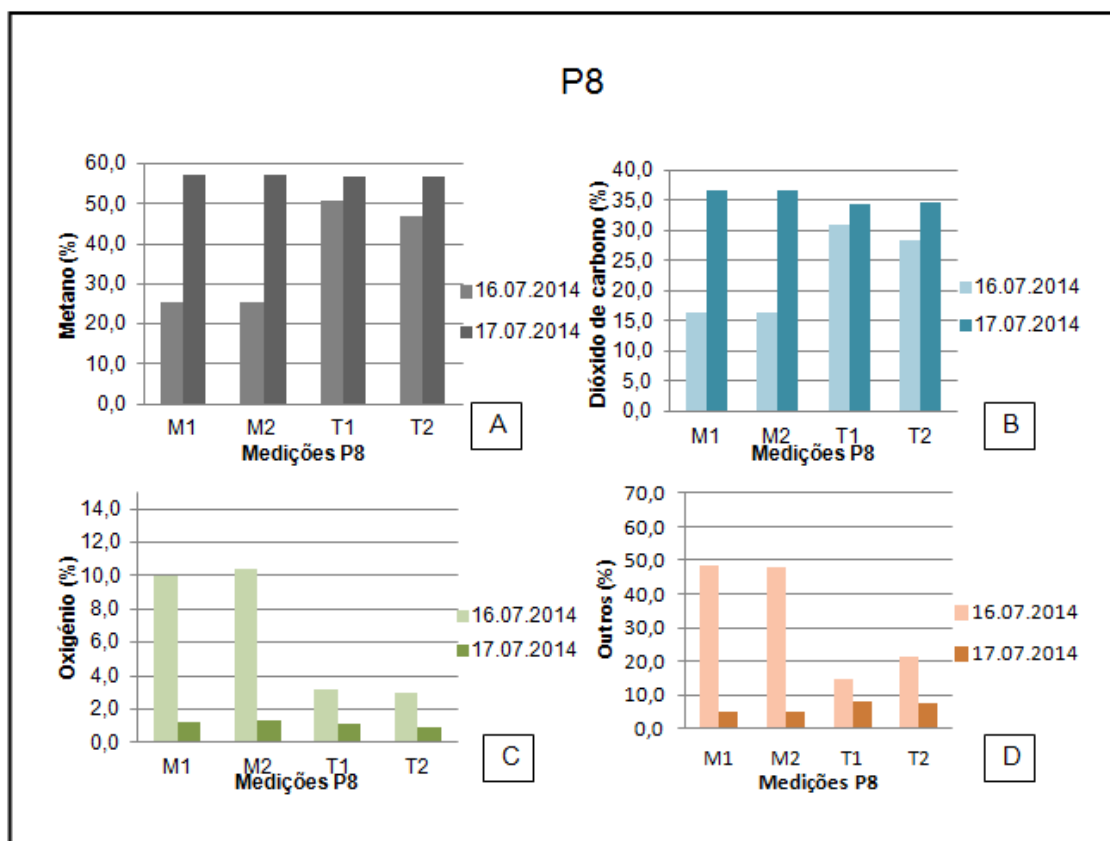


Figura 6.24- Medições do biogás na 2ª campanha no poço P8. A- Percentagem de metano ( $\text{CH}_4$ ). B- Percentagem de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). C- Percentagem de oxigênio ( $\text{O}_2$ ). D- Percentagem de outros gases

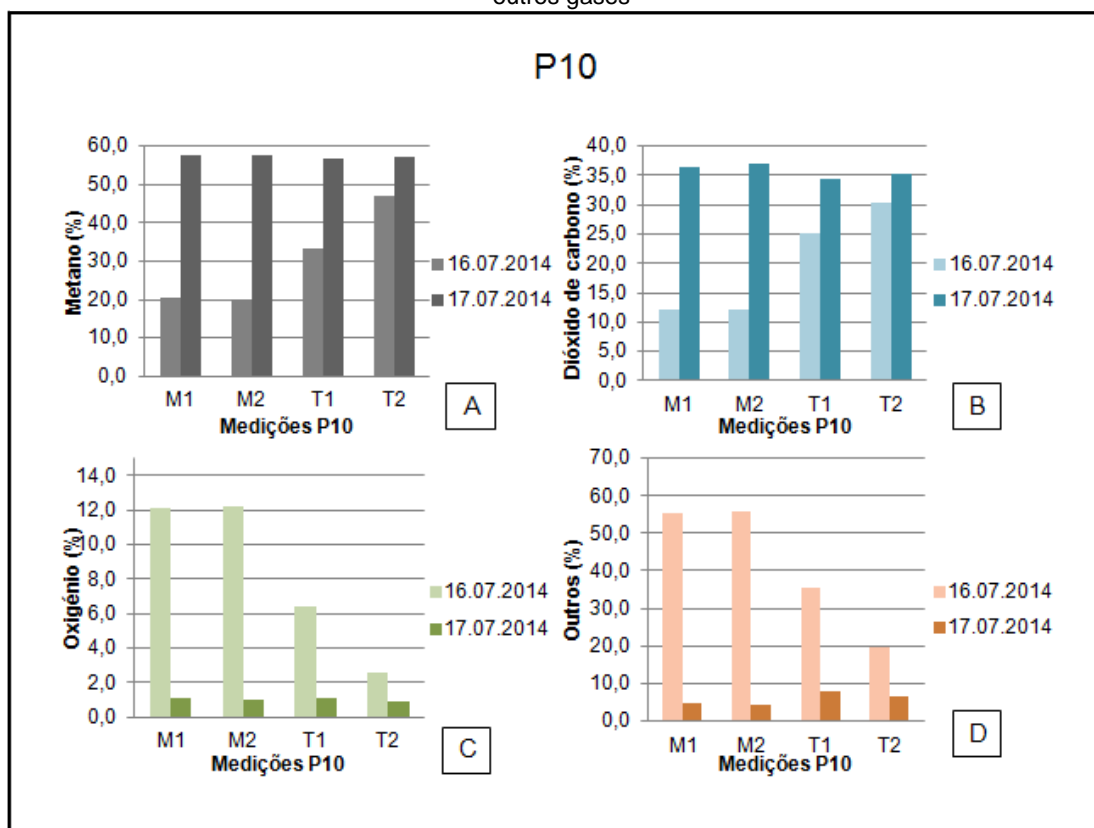


Figura 6.25 - Medições do biogás na 2ª campanha no poço P10. A- Percentagem de metano ( $\text{CH}_4$ ). B- Percentagem de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). C- Percentagem de oxigênio ( $\text{O}_2$ ). D- Percentagem de outros gases

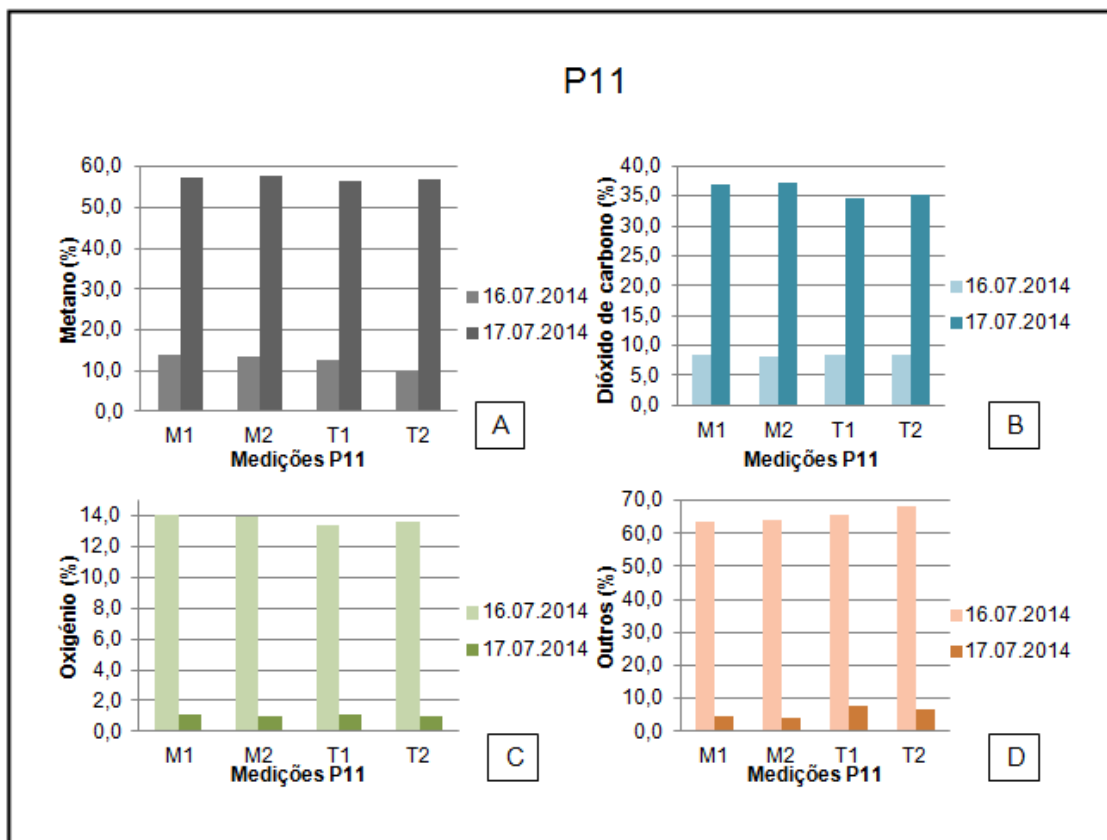


Figura 6.26 - Medições do biogás na 2ª campanha no poço P11. A- Percentagem de metano ( $\text{CH}_4$ ). B- Percentagem de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). C- Percentagem de oxigênio ( $\text{O}_2$ ). D- Percentagem de outros gases

Os gráficos da Figura 6.27, da Figura 6.28 e da Figura 6.29 mostram os valores médios diários percentuais obtidos pela monitorização dos poços de biogás (P8, P10 e P11) na 2ª campanha. Ao analisar os gráficos, observa-se uma melhoria significativa nos valores médios do biogás do primeiro para o segundo dia de monitorização. Esta melhoria deve-se, principalmente, ao aumento médio superior a 20% do metano ( $\text{CH}_4$ ) e à diminuição média superior a 6% do oxigênio ( $\text{O}_2$ ), presente na composição do biogás.

Destaca-se o poço P11, onde a melhoria na qualidade do biogás foi mais significativa, conseguindo-se aumentar o  $\text{CH}_4$  de 12% para 57% e diminuir o  $\text{O}_2$  de 14% para 1%, em valores médios.

Apesar das oscilações que se obteve nas medições ao longo dos dias de monitorização, em termos médios, a melhoria na qualidade do biogás é significativa, revelando o efeito positivo do carregamento das valas com água lixiviante.

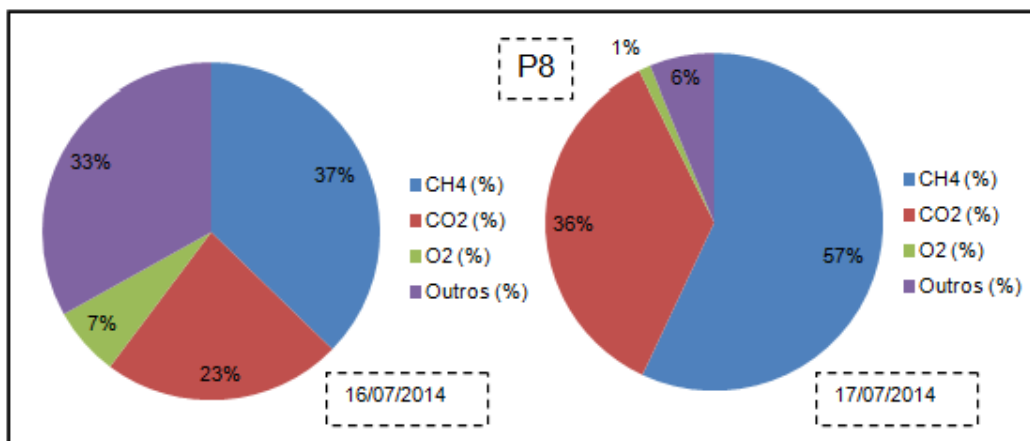


Figura 6.27 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P8 nos dias 16/07/2014 e 17/07/2014

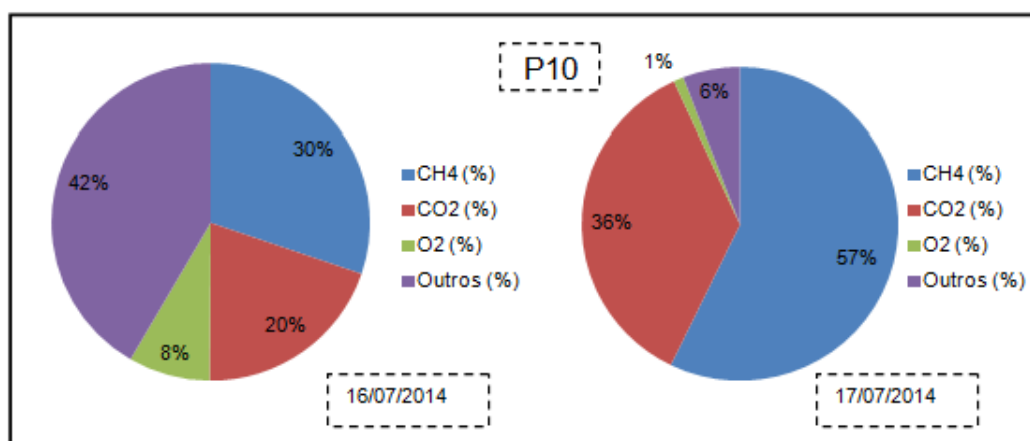


Figura 6.28 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P10 nos dias 16/07/2014 e 17/07/2014

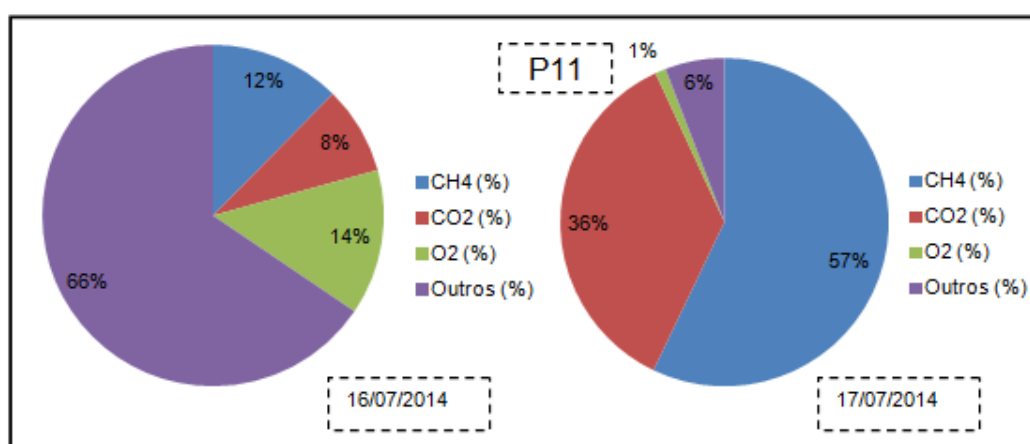


Figura 6.29 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P11 nos dias 16/07/2014 e 17/07/2014

## 6.3. Terceira Campanha

### 6.3.1. Célula B

A terceira campanha, em que a recolha de dados decorreu nos dias 29 e 30 de Julho de 2014, teve como principal objetivo aferir a influência dos poços de biogás existentes na área envolvente dos poços P1, P2 e P3 da célula B.

Deste modo e de forma a cumprir com o objetivo estipulado, inativaram-se todos os poços num raio de, aproximadamente, 20 m dos poços P1, P2 e P3. Os dados obtidos na monitorização estão apresentados na Tabela 6.6 e nos gráficos da Figura 6.30, da Figura 6.32 e da Figura 6.31.

Tabela 6.6 - Resultados da 3ª campanha das medições de biogás nos drenos P1, P2 e P3 (29/07/2014 e 30/07/2014)

		P1							
		29-07-2014				30-07-2014			
		Manhã		Tarde		Manhã		Tarde	
Biogás	CH <sub>4</sub> (%)	56,2	55,9	42,8	46,9	57,9	56,9	51,2	53,7
	CO <sub>2</sub> (%)	38,3	38,2	31,3	33,2	38,0	37,1	36,9	37,8
	O <sub>2</sub> (%)	1,0	1,0	2,1	2,0	1,0	1,0	1,9	1,4
	Outros (%)	4,5	4,9	23,8	17,9	3,1	5,0	10,0	7,1
		P2							
		29-07-2014				30-07-2014			
		Manhã		Tarde		Manhã		Tarde	
Biogás	CH <sub>4</sub> (%)	56,9	56,5	55,4	56,1	53,4	57,4	52,8	52,7
	CO <sub>2</sub> (%)	36,4	37,2	33,7	33,7	36,5	36,5	36,4	36,3
	O <sub>2</sub> (%)	1,1	1,2	1,0	1	1,5	1,5	1,7	1,8
	Outros (%)	5,6	5,1	9,9	9,2	8,6	4,6	9,1	9,2
		P3							
		29-07-2014				30-07-2014			
		Manhã		Tarde		Manhã		Tarde	
Biogás	CH <sub>4</sub> (%)	49,7	48,9	39,2	38,9	50,3	50,0	44,7	43,2
	CO <sub>2</sub> (%)	38,1	37,2	31,7	32,8	37,6	37,4	34,9	34,4
	O <sub>2</sub> (%)	1,3	1,4	2,5	2,6	1,0	1,0	2,2	2,6
	Outros (%)	10,9	12,5	26,6	25,7	11,1	11,6	18,2	19,8

Ao analisar os resultados obtidos na terceira campanha, apresentados na Tabela 6.6, correspondentes aos valores obtidos na monitorização dos poços da célula B, quando inativados os poços num raio de 20 m, aproximadamente, dos novos poços (P1, P2 e P3), verificou-se que os valores de metano (CH<sub>4</sub>) mantêm-se acima dos 50%, em praticamente todos os momentos da monitorização, à exceção do poço P3 (Figura 6.31 A).

Relativamente à percentagem de oxigénio (O<sub>2</sub>), nos poços P1 (Figura 6.30 C) e P2 (Figura 6.32 C) mantem-se abaixo dos 2,1% e no poço P3 (Figura 6.31 C) apresenta alguns valores acima dos 2%.

Comparando os valores obtidos na terceira campanha com os valores obtidos na segunda campanha, constata-se que os valores obtidos para o poço P1 (Figura 6.16 e Figura 6.30) e P2 (Figura 6.17 e Figura 6.32) mantêm-se aproximadamente constantes, embora os valores de oxigênio ( $O_2$ ) apresentem um máximo mais baixo na terceira campanha (2,1% e 1,8%, respetivamente).

Também, comparando os valores obtidos na terceira campanha com os valores obtidos na segunda campanha para o poço P3 (Figura 6.18 e Figura 6.31), verifica-se que, de uma forma geral, os valores da percentagem de metano ( $CH_4$ ) diminuíram, uma vez que em quase todos os momentos de monitorização mantiveram-se abaixo dos 50%. Relativamente à percentagem de oxigênio ( $O_2$ ), os valores obtidos na terceira campanha apresentam um máximo mais baixo (2,6%), uma vez que o máximo obtido na segunda campanha foi de 3,9%.

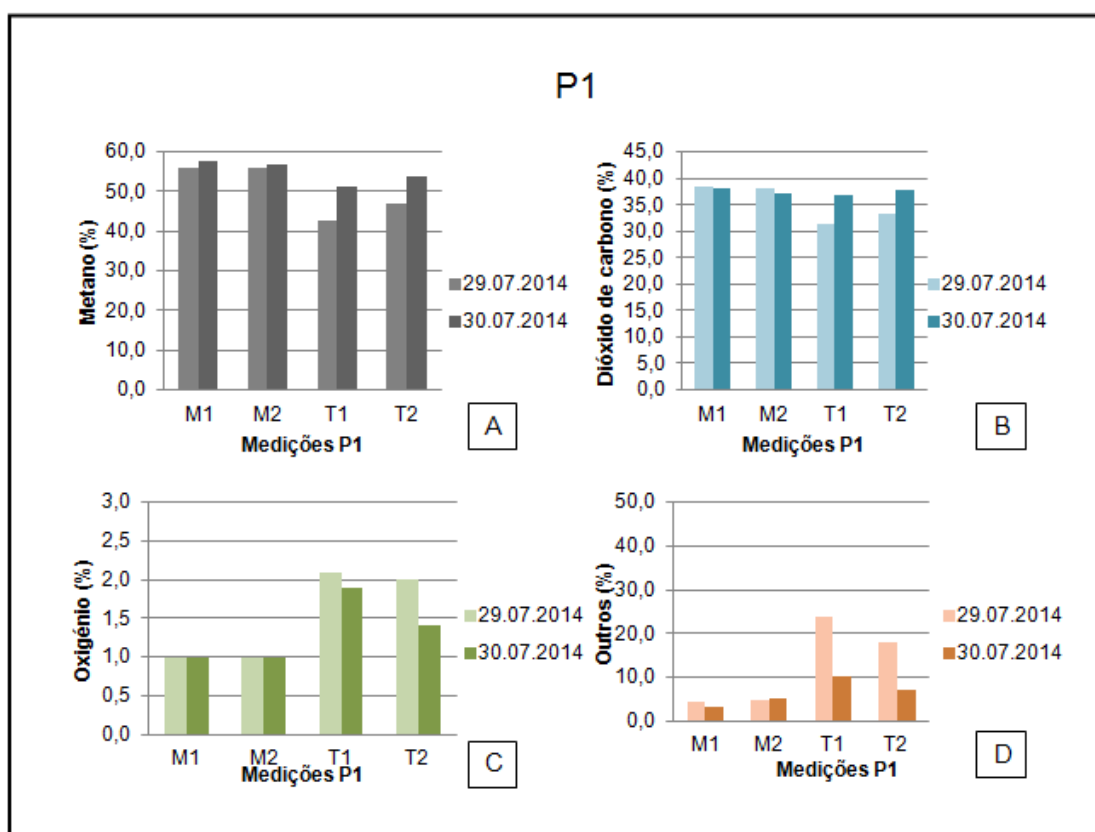


Figura 6.30 - Medições do biogás na 3ª campanha no poço P1. A- Percentagem de metano ( $CH_4$ ). B- Percentagem de dióxido de carbono ( $CO_2$ ). C- Percentagem de oxigénio ( $O_2$ ). D- Percentagem de outros gases



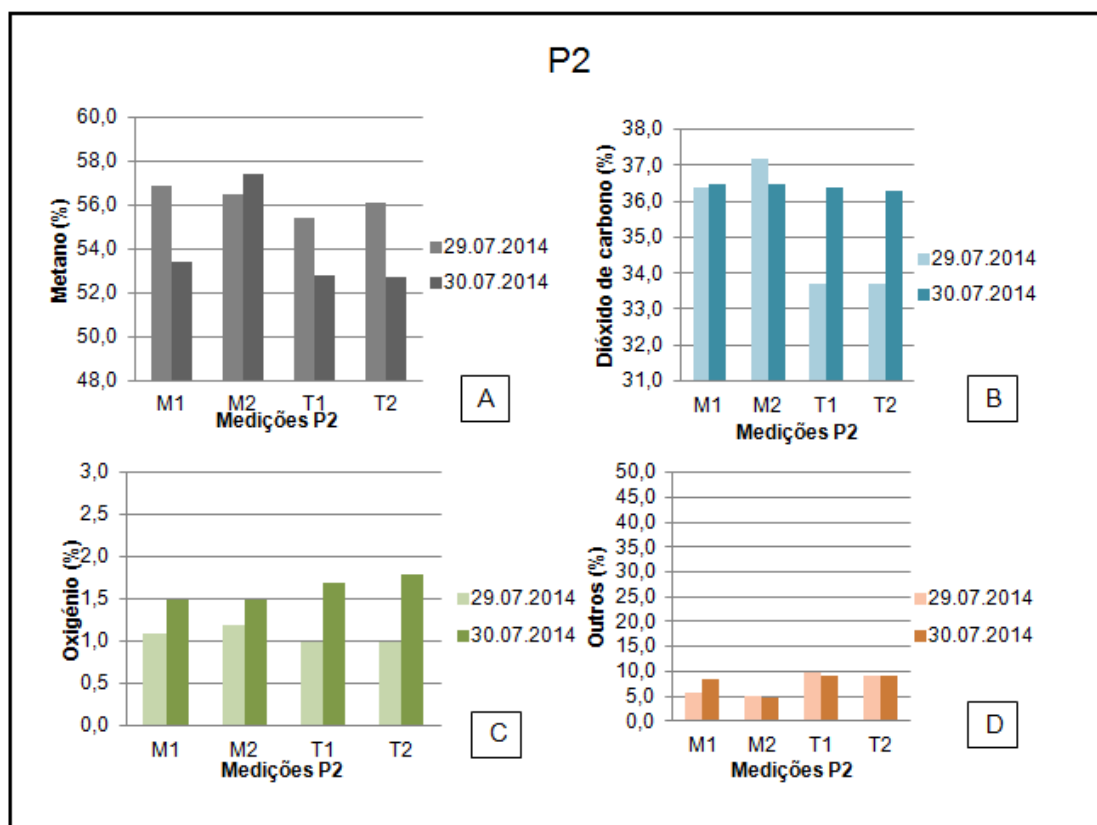


Figura 6.32 - Medições do biogás na 3ª campanha no poço P2. A- Percentagem de metano ( $\text{CH}_4$ ). B- Percentagem de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). C- Percentagem de oxigênio ( $\text{O}_2$ ). D- Percentagem de outros gases

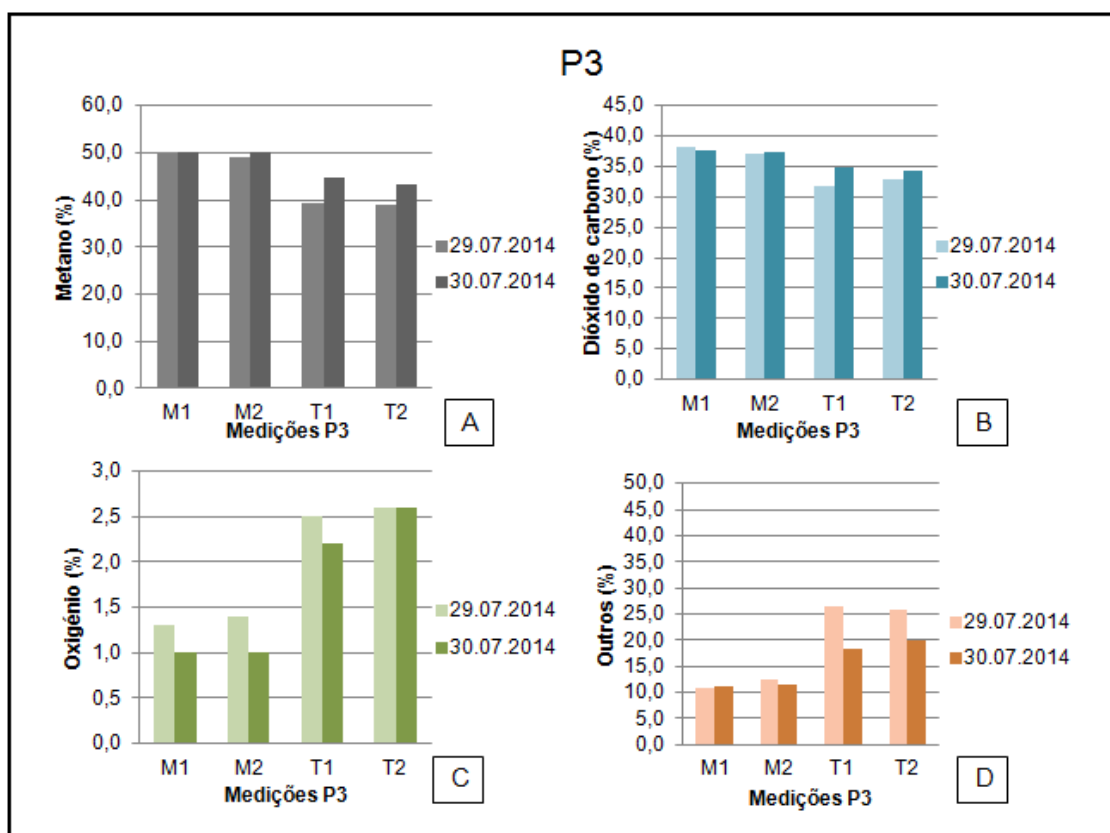


Figura 6.31 - Medições do biogás na 3ª campanha no poço P3. A- Percentagem de metano ( $\text{CH}_4$ ). B- Percentagem de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). C- Percentagem de oxigênio ( $\text{O}_2$ ). D- Percentagem de outros gases



Os gráficos da Figura 6.33, da Figura 6.34 e da Figura 6.35 mostram os valores médios diários percentuais obtidos pela monitorização dos poços de biogás (P1, P2 e P3) na 3ª campanha. Ao analisar os gráficos, observa-se uma melhoria ligeira nos valores médios do biogás do primeiro para o segundo dia de monitorização, à exceção do poço P2, que sofre um ligeiro decréscimo no valor médio de metano ( $\text{CH}_4$ ) e um aumento no valor médio do oxigénio ( $\text{O}_2$ ).

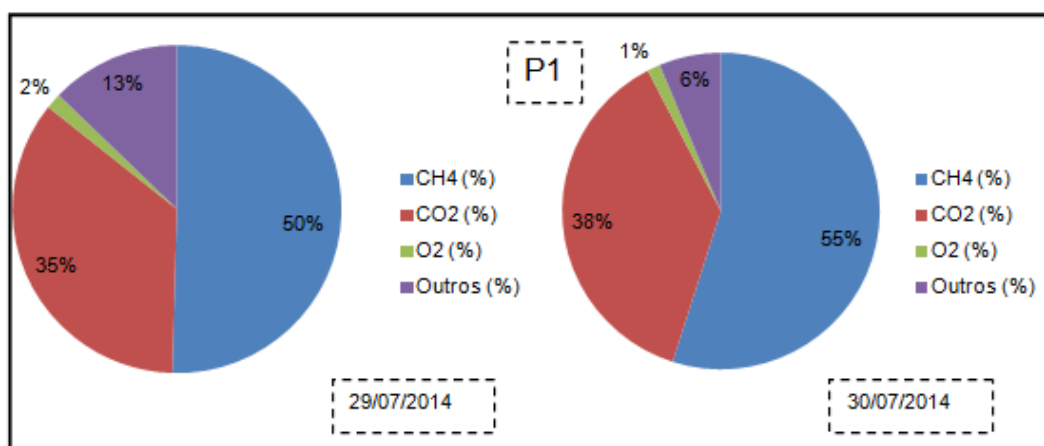


Figura 6.33 - Valores médios diários percentuais da monitorização do poço P1 nos dias 29/07/2014 e 30/07/2014

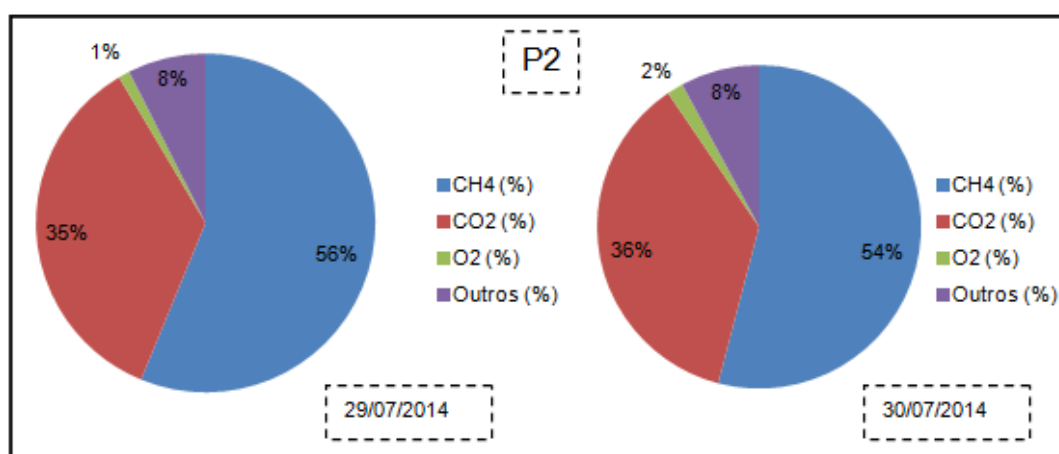


Figura 6.34 - Valores médios diários percentuais da monitorização do poço P2 nos dias 29/07/2014 e 30/07/2014

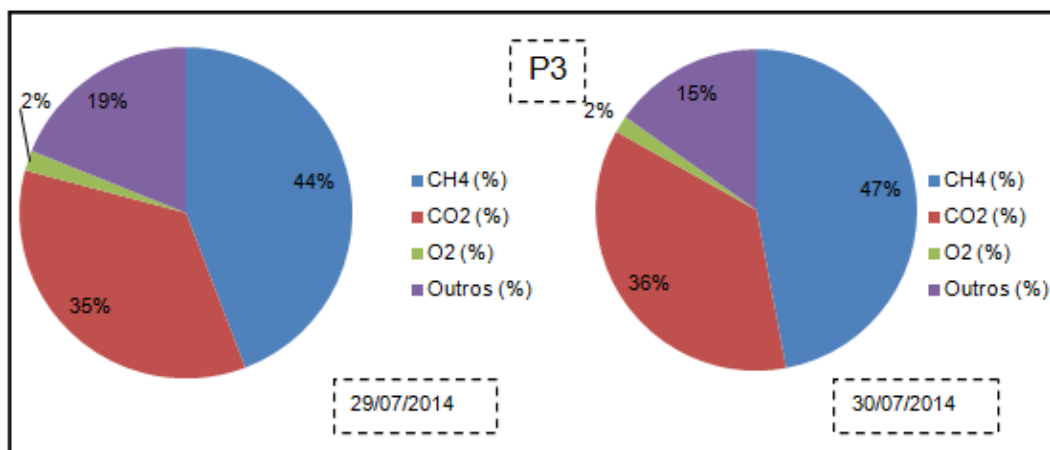


Figura 6.35 - Valores médios diários percentuais da monitorização do poço P3 nos dias 29/07/2014 e 30/07/2014

### 6.3.2. Célula C

Na terceira campanha, os trabalhos decorridos na célula C foram uma continuação dos trabalhos realizados durante a segunda campanha. Deste modo, as valas executadas juntos aos poços P8, P9 e P10 foram recarregadas com água lixiviante dois dias por semana, normalmente à 2ª e à 6ª feira (Figura 6.36).



Figura 6.36 - Recarregamento com água lixiviante da vala em volta do poço P11 (Foto tirada por Ana Silva a 30/07/2014)

Na célula C, também os poços de biogás num raio de 20 m dos poços P8, P10 e P11 foram inativados para se perceber de que forma a existência de um menor número de poços ativos influência o comportamento dos poços em estudo. Os dados recolhidos na monitorização dos poços P8, P9 e P10 na terceira campanha são mostrados na Tabela 6.7, e suportados com os gráficos da Figura 6.37, da Figura 6.38 e da Figura 6.39.

Tabela 6.7 - Resultados da 3ª campanha das medições de biogás nos drenos P8, P10 e P11 (29/07/2014 e 30/07/2014)

		P8							
		29-07-2014				30-07-2014			
		Manhã		Tarde		Manhã		Tarde	
Biogás	CH <sub>4</sub> (%)	49,6	55,4	55,3	50,5	58,0	57,9	45,2	57,1
	CO <sub>2</sub> (%)	32,0	33,7	34,2	35,8	34,5	34,0	29,9	34,8
	O <sub>2</sub> (%)	1,0	2,1	2,1	4,3	1,6	1,5	3,6	1,4
	Outros (%)	17,4	8,8	8,4	9,4	5,9	6,6	21,3	6,7
		P10							
		29-07-2014				30-07-2014			
		Manhã		Tarde		Manhã		Tarde	
Biogás	CH <sub>4</sub> (%)	50,5	57,8	54,0	49,8	59,9	59,9	42,9	49,6
	CO <sub>2</sub> (%)	30,5	33,9	31,8	33,8	35,4	34,9	26,5	26,8
	O <sub>2</sub> (%)	3,7	1,5	2,2	5,1	1,0	1,3	5,1	4,8
	Outros (%)	15,3	6,8	12,0	11,3	3,7	3,9	25,5	18,8
		P11							
		29-07-2014				30-07-2014			
		Manhã		Tarde		Manhã		Tarde	
Biogás	CH <sub>4</sub> (%)	38,2	52,9	26,4	33,6	59,1	60,6	42,5	47,1
	CO <sub>2</sub> (%)	25,4	32,4	17,1	22,0	34,7	32,7	26,8	29,4
	O <sub>2</sub> (%)	6,6	2,3	10,1	9,6	1,2	1,1	4,8	3,3
	Outros (%)	29,8	12,4	46,4	34,8	5	5,6	25,9	20,2

Ao observar a Tabela 6.7, verificou-se que os valores obtidos na monitorização dos poços P8 (Figura 6.37 A) e P10 (Figura 6.38 A), correspondentes ao teor de metano (CH<sub>4</sub>), situam-se no geral acima dos 50%. Enquanto, as medições efetuadas no poço P11 (Figura 6.39 A) revelam valores inconstantes, que oscilam entre 26,4% (mínimo) e 60,6% (máximo).

Relativamente aos valores de oxigénio, verificou-se que de uma forma geral as percentagens mais elevadas de oxigénio (O<sub>2</sub>), correspondem às percentagens de metano (CH<sub>4</sub>) mais baixas e conforme os valores de CH<sub>4</sub> aumentam ou diminuem, o inverso se observa nos valores de O<sub>2</sub>, como se verifica ao analisar a Figura 6.39 A e C.

Nas medições efetuadas na parte da manhã do dia 30 de Julho (M1 e M2), verifica-se uma alteração significativa nos valores de biogás, tanto na percentagem de metano (CH<sub>4</sub>) como na percentagem de oxigénio (O<sub>2</sub>). Esta alteração foi positiva e constatou-se que foi após recarregar as valas em volta dos poços P8, P10 e P11 com água lixiviante, o que permite concluir que quando há recarga das valas, aumentando a humidade da massa de resíduos e tamponizando a superfície em volta dos poços, a qualidade do biogás melhora significativamente.

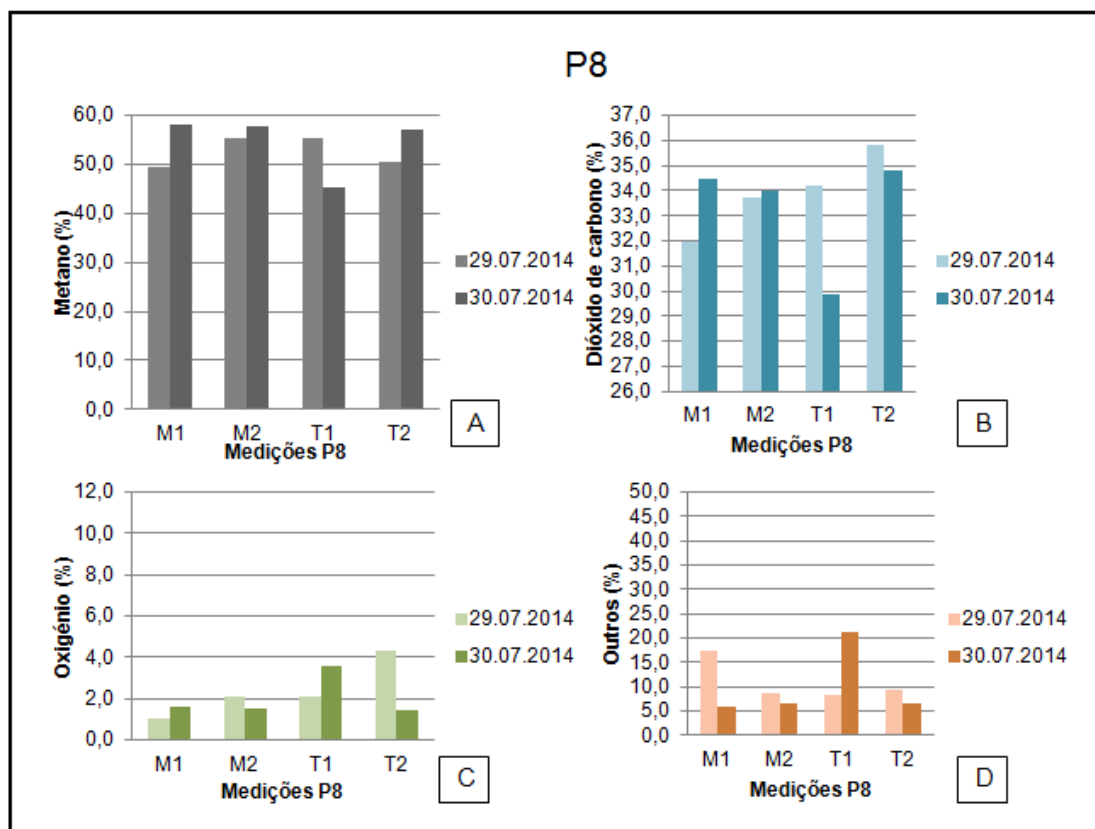


Figura 6.37 - Medições do biogás na 3ª campanha no poço P8. A- Percentagem de metano ( $\text{CH}_4$ ). B- Percentagem de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). C- Percentagem de oxigênio ( $\text{O}_2$ ). D- Percentagem de outros gases

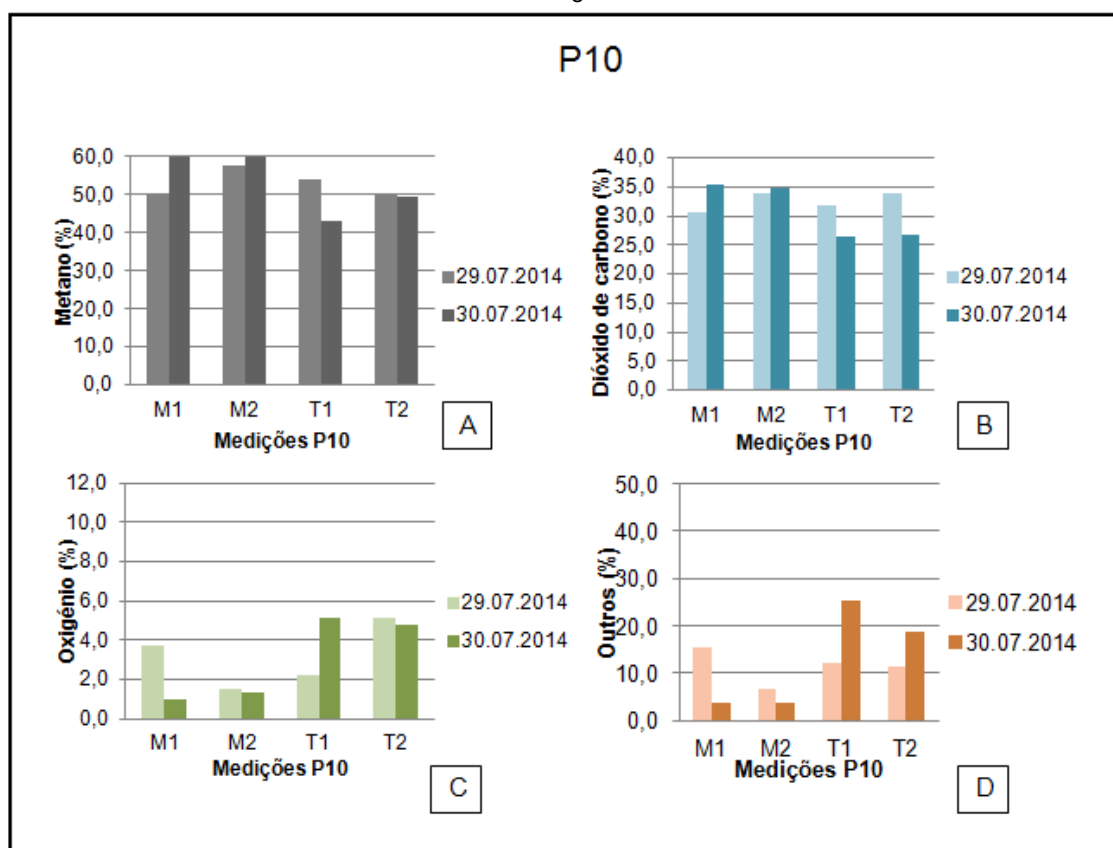


Figura 6.38 - Medições do biogás na 3ª campanha no poço P10. A- Percentagem de metano ( $\text{CH}_4$ ). B- Percentagem de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). C- Percentagem de oxigênio ( $\text{O}_2$ ). D- Percentagem de outros gases

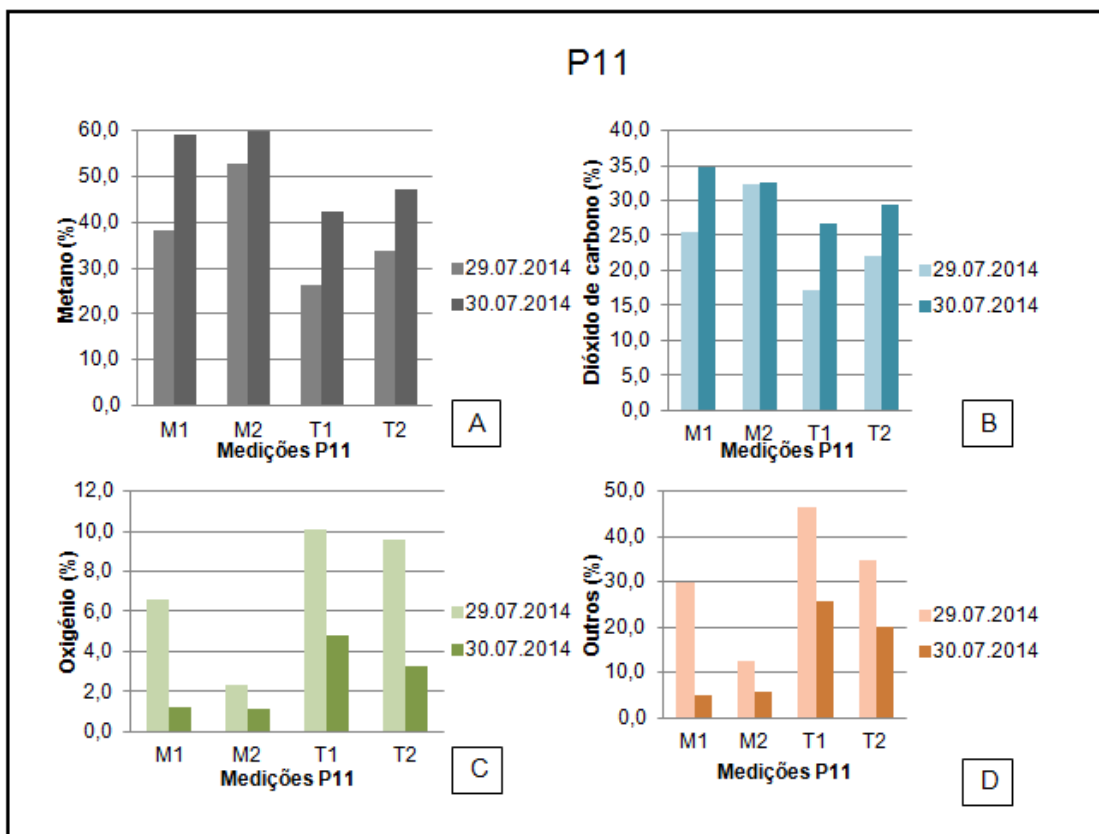


Figura 6.39 - Medições do biogás na 3ª campanha no poço P11. A- Percentagem de metano ( $\text{CH}_4$ ). B- Percentagem de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). C- Percentagem de oxigénio ( $\text{O}_2$ ). D- Percentagem de outros gases

Os gráficos da Figura 6.40, da Figura 6.41 e da Figura 6.42 mostram os valores médios diários percentuais obtidos pela monitorização dos poços de biogás (P8, P10 e P11) na 3ª campanha. Ao analisar os gráficos, observa-se uma melhoria nos valores médios do biogás do primeiro para o segundo dia de monitorização, à exceção do poço P10, que se mantém constante, relativamente aos valores médios do metano ( $\text{CH}_4$ ) e do oxigénio ( $\text{O}_2$ ).

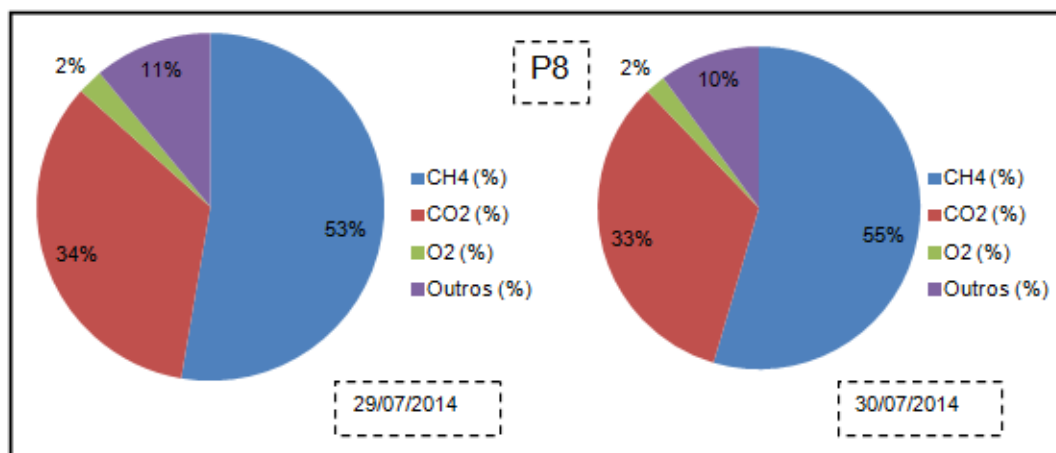


Figura 6.40 - Valores médios diários percentuais da monitorização do poço P8 nos dias 29/07/2014 e 30/07/2014

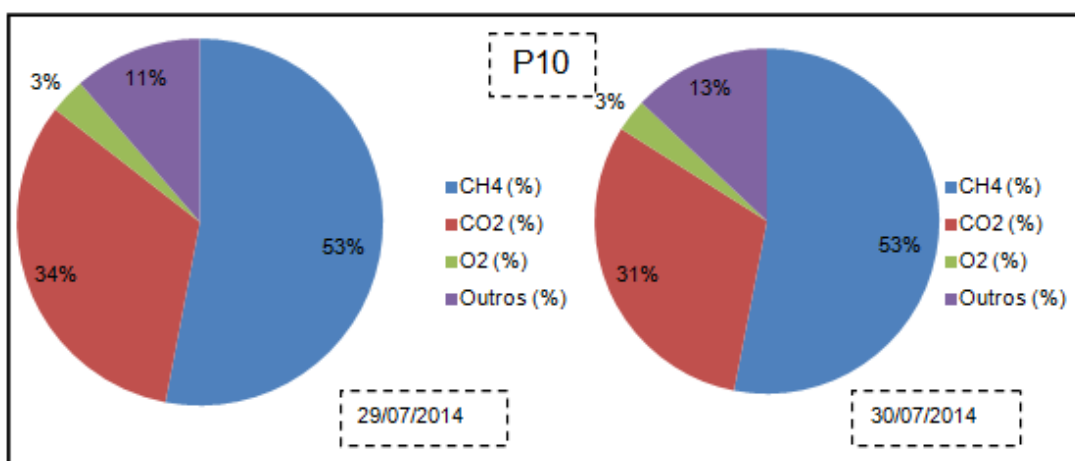


Figura 6.41 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P10 nos dias 29/07/2014 e 30/07/2014

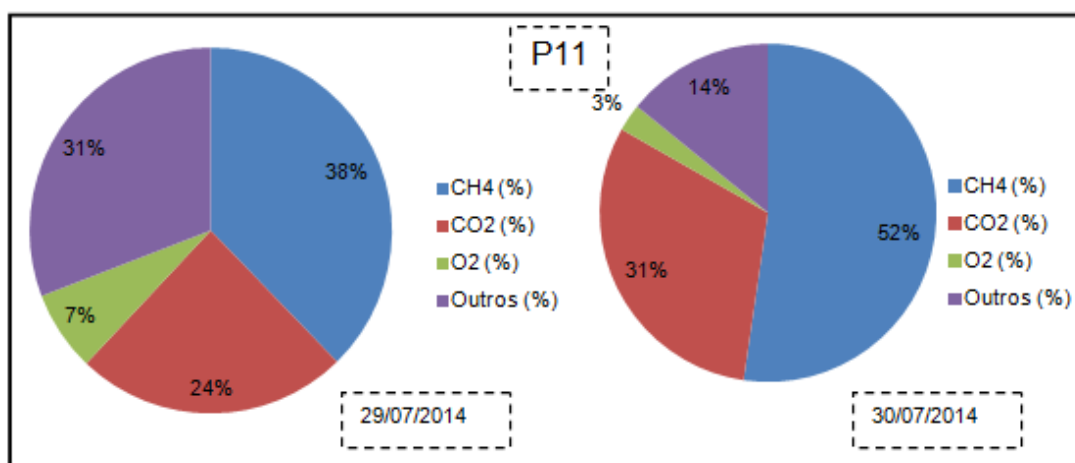


Figura 6.42 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P11 nos dias 29/07/2014 e 30/07/2014

## 6.4. Quarta Campanha

### 6.4.1. Célula B

A quarta campanha decorreu nos dias 26 e 27 de Agosto de 2014 e os trabalhos desenvolvidos visaram complementar os realizados nas campanhas anteriores.

Na célula B tentou-se desenvolver o mesmo conceito que foi desenvolvido na célula C, ou seja, após avaliar o comportamento e o desenvolvimento dos novos poços (P1, P2 e P3), efetuaram-se valas em volta dos mesmos (Figura 6.43), com dimensões de 1,5 a 2,0 m x 1,0 m x comprimento variável, que foram carregadas com água lixiviante e recarregas três vezes por semana (Figura 6.44).





Figura 6.43 - Vala executada em volta do poço P1 (Foto tirada a 26/08/2014 por Ana Silva)



Figura 6.44 - Vala poço P1 carregada com lixiviado (Foto tirada a 27/08/2014 por Ana Silva)

Após o período de enchimento das valas com água lixiviante realizaram-se medições do biogás durante dois dias, duas vezes de manhã e duas vezes à tarde. Na Tabela 6.8 são apresentados os valores das medições do biogás, assim como na Figura 6.45, na Figura 6.46 e na Figura 6.47, correspondentes aos dias 26 e 27 de Agosto.

Tabela 6.8 - Resultados da 4ª campanha das medições de biogás nos drenos P1, P2 e P3 (26/08/2014 e 27/08/2014)

		P1							
		26-08-2014				27-08-2014			
		Manhã		Tarde		Manhã		Tarde	
Biogás	CH <sub>4</sub> (%)	28,0	27,7	41,0	47,6	58,5	57,4	52,5	58,0

	CO <sub>2</sub> (%)	27,1	25,8	28,2	34,0	30,4	30,7	28,6	34,6
	O <sub>2</sub> (%)	3,0	3,8	3,4	3,2	1,6	1,6	1,5	1,4
	Outros (%)	41,9	42,7	27,4	15,2	9,5	10,3	17,4	6,0
		<b>P2</b>							
		<b>26-08-2014</b>				<b>27-08-2014</b>			
		Manhã		Tarde		Manhã		Tarde	
<b>Biogás</b>	CH <sub>4</sub> (%)	57,4	55,4	54,4	32,4	29,5	33,9	30,0	37,2
	CO <sub>2</sub> (%)	35,0	34,2	31,8	19,3	16,8	19,0	15,5	18,6
	O <sub>2</sub> (%)	1,3	0,6	1,6	9,8	10,2	10,0	9,9	9,7
	Outros (%)	6,3	9,8	12,2	38,5	43,5	37,1	44,6	34,5
		<b>P3</b>							
		<b>26-08-2014</b>				<b>27-08-2014</b>			
		Manhã		Tarde		Manhã		Tarde	
<b>Biogás</b>	CH <sub>4</sub> (%)	37,8	37,8	38,7	40,1	43,6	51,1	45,9	52,4
	CO <sub>2</sub> (%)	31,6	31,3	32,9	35,7	30,5	38,2	29,4	34,2
	O <sub>2</sub> (%)	1,7	1,8	1,9	2,4	2,1	2,1	2,0	2,0
	Outros (%)	28,9	29,1	26,5	21,8	23,8	8,6	22,7	11,4

Ao analisar os resultados obtidos na monitorização dos poços P1 (Figura 6.45), P2 (Figura 6.46) e P3 (Figura 6.47), verifica-se que não se consegue estabelecer um padrão no comportamento dos três poços, dada a variabilidade observada nos valores apresentados.

O poço P2 (Figura 6.46) apresentou melhor qualidade de biogás no primeiro dia de monitorização, pelo que no segundo dia os valores de metano (CH<sub>4</sub>) diminuíram (Figura 6.46 A) e os de oxigénio (O<sub>2</sub>) aumentaram (Figura 6.46 C). Salienta-se que no segundo dia, embora se tenha recarregado as valas, nos momentos da monitorização verificou-se que a vala do poço P2 encontrava-se seca, através de observação direta no local.

Nos poços P1 (Figura 6.45) e P3 (Figura 6.47), verificaram-se valores de metano (CH<sub>4</sub>) mais elevados e de oxigénio (O<sub>2</sub>) mais baixos no segundo dia de monitorização, embora tenha ocorrido uma melhoria mais significativa nos valores obtidos no poço P1 (Figura 6.45 A e C). Após recarga das valas com água lixiviante e nos momentos da monitorização, verificou-se que a vala do poço P1 (Figura 6.45) ainda continha água lixiviante e que a vala do poço P3 (Figura 6.47) apresentava algum teor de humidade, embora não se observasse água lixiviante no interior da vala.



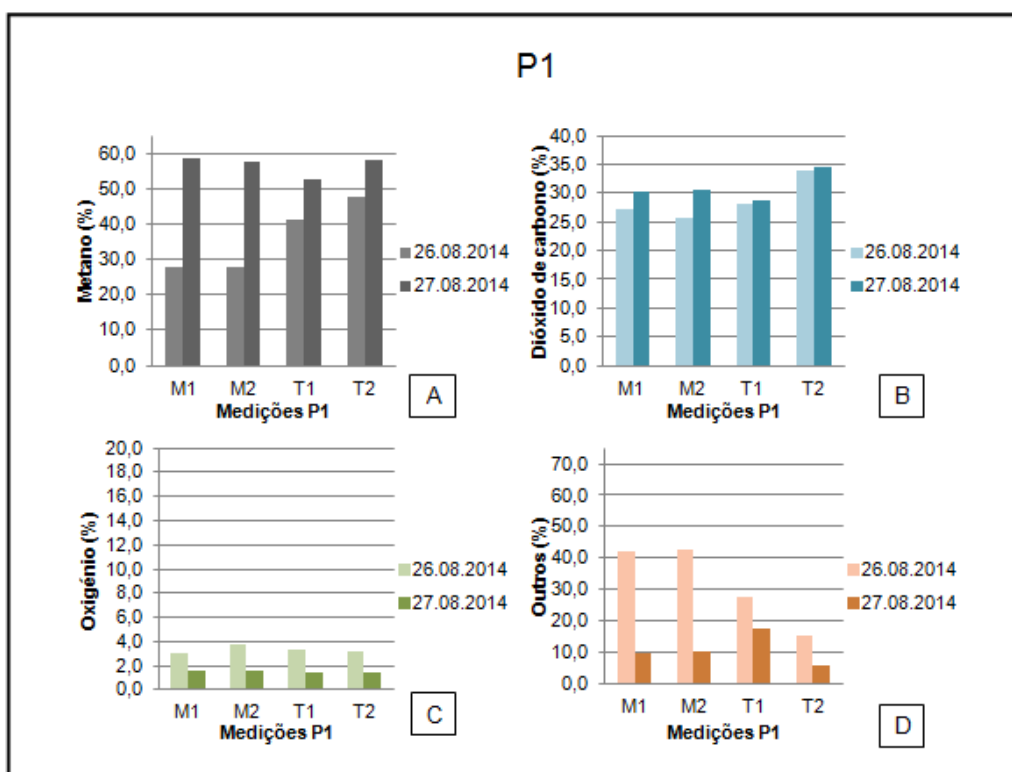


Figura 6.45 - Medições do biogás na 4ª campanha no poço P1. A- Percentagem de metano ( $\text{CH}_4$ ). B- Percentagem de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). C- Percentagem de oxigénio ( $\text{O}_2$ ). D- Percentagem de outros gases

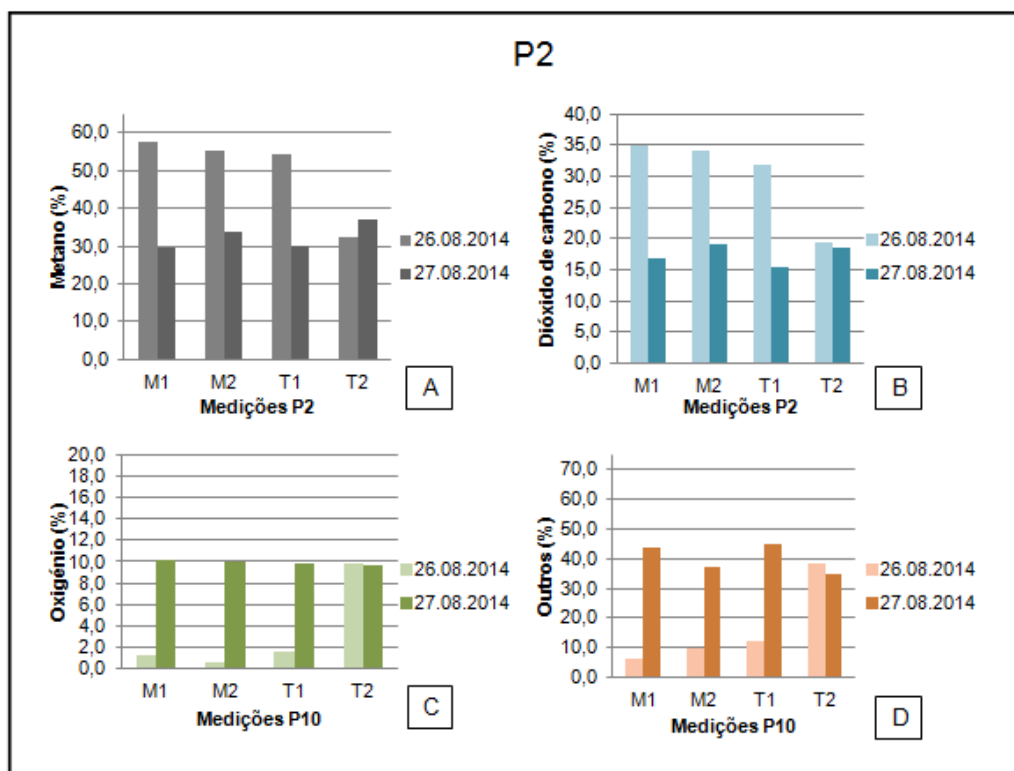


Figura 6.46 - Medições do biogás na 4ª campanha no poço P2. A- Percentagem de metano ( $\text{CH}_4$ ). B- Percentagem de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). C- Percentagem de oxigénio ( $\text{O}_2$ ). D- Percentagem de outros gases

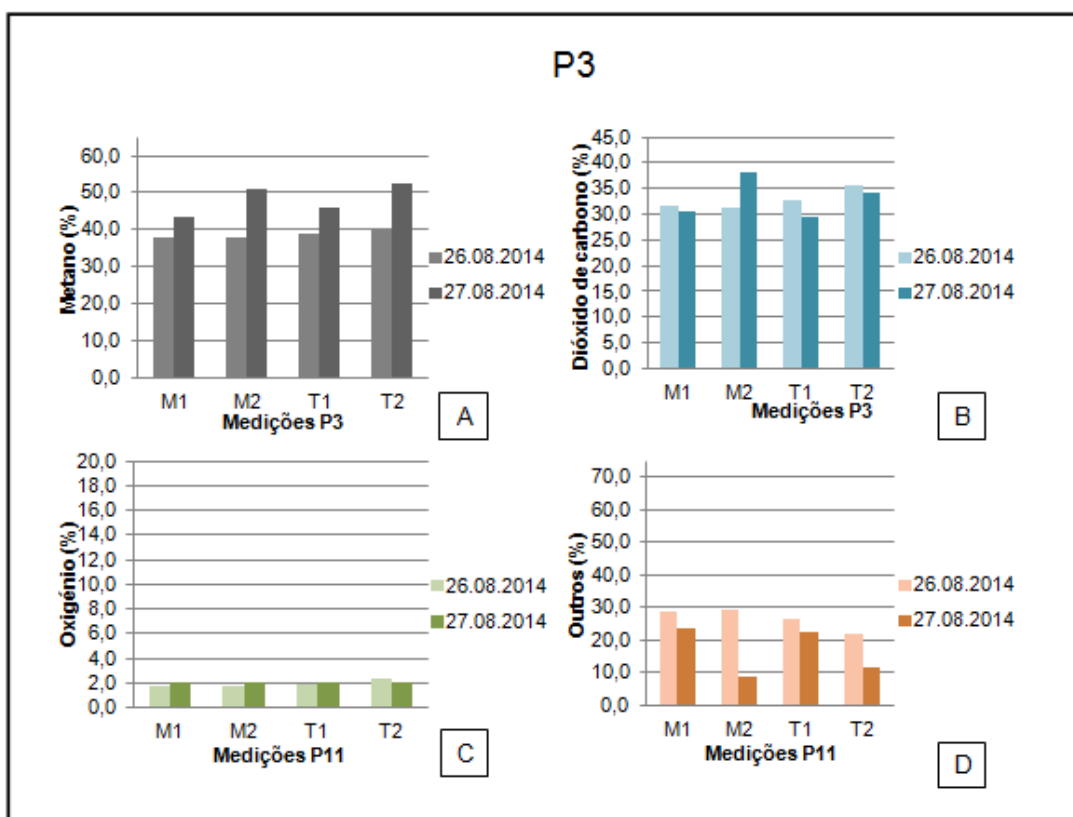


Figura 6.47 - Medições do biogás na 4ª campanha no poço P3. A- Percentagem de metano ( $\text{CH}_4$ ). B- Percentagem de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). C- Percentagem de oxigénio ( $\text{O}_2$ ). D- Percentagem de outros gases

Os gráficos da Figura 6.48, da Figura 6.49 e da Figura 6.50 mostram os valores médios diários percentuais obtidos pela monitorização dos poços de biogás (P1, P2 e P3) na 4ª campanha. Ao analisar os gráficos, observa-se uma melhoria nos valores médios do biogás do primeiro para o segundo dia de monitorização, à exceção do poço P2, onde o valor médio de metano ( $\text{CH}_4$ ) diminui e o valor médio de oxigénio ( $\text{O}_2$ ) aumenta.

Relativamente ao poço P3, destaca-se o facto de o valor médio de metano ( $\text{CH}_4$ ) aumentar, no 2º dia de monitorização, no entanto o valor médio de oxigénio ( $\text{O}_2$ ) mantém-se constante (2%).

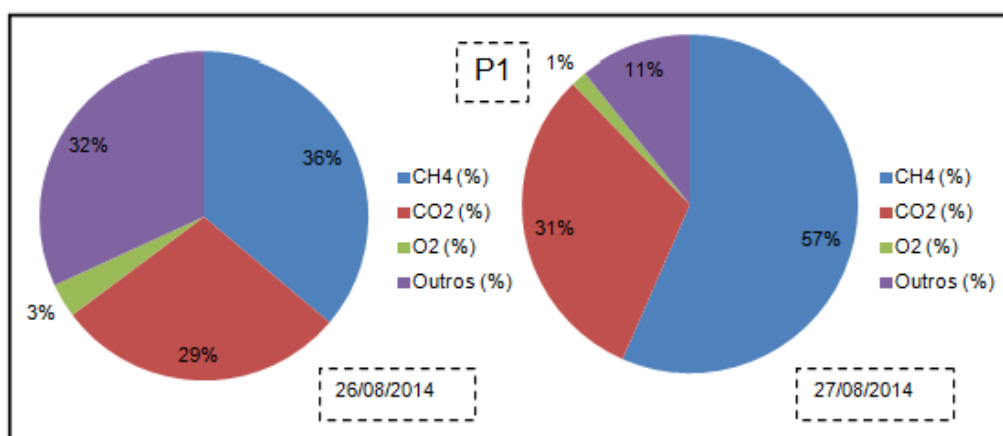


Figura 6.48 - Valores médios diários percentuais da monitorização do poço P1 nos dias 26/08/2014 e 27/08/2014

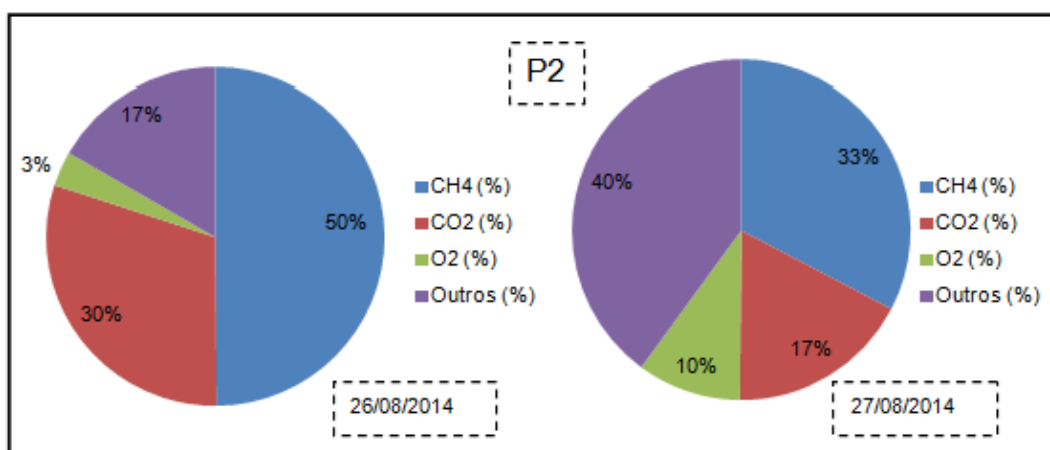


Figura 6.49 - Valores médios diários percentuais da monitorização do poço P2 nos dias 26/08/2014 e 27/08/2014

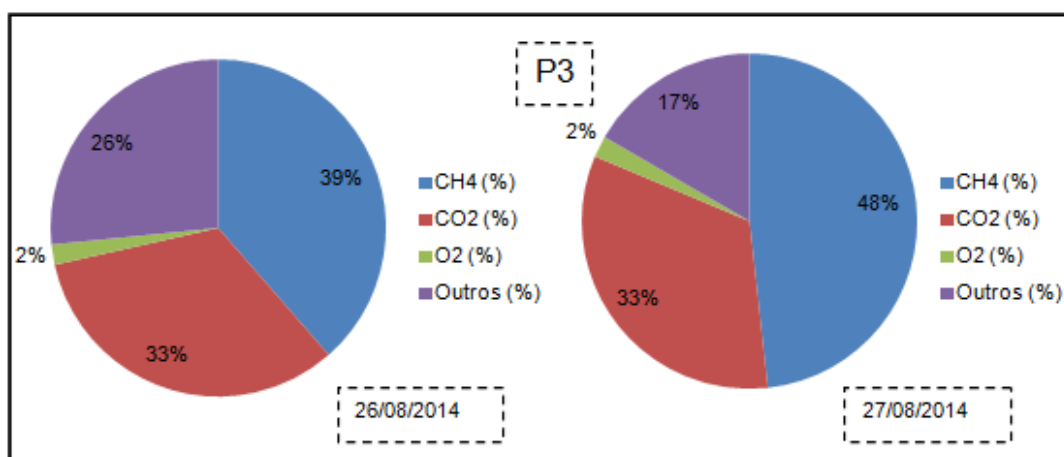


Figura 6.50 - Valores médios diários percentuais da monitorização do poço P3 nos dias 26/08/2014 e 27/08/2014

### 6.4.2. Célula C

Na célula C, a quarta campanha consistiu numa nova intervenção na vala efetuada em volta de poço P11 e na continuação da monitorização dos poços P8, P10 e P11.

A intervenção realizada na vala do poço P10 (Figura 6.51) teve como objetivo tamponar a mesma criando uma zona drenante no seu interior. Deste modo, a vala foi cheia com brita (Figura 6.52) e coberta com geomembrana (Figura 6.53) para desta forma avaliar a influência desta técnica na qualidade do biogás.



Figura 6.51 - Poço P11 (Foto tirada a 13/08/2014)



Figura 6.52 - Vala Poço P11 cheia com brita (Foto tirada a 13/08/2014)



Figura 6.53 - Vala poço P11 tapada com geomembrana (Foto tirada a 13/08/2014)

As valas continuaram a ser carregadas com água lixiviante duas vezes por semana e a monitorização do biogás realizou-se pelo período de dois dias (26 e 27 de Agosto), efetuando-se as medições duas vezes de manhã e duas vezes à tarde. Na Tabela 6.9, são apresentados os resultados das medições efetuadas nos poços P8 (Figura 6.54), P10 (Figura 6.55) e P11 (Figura 6.56).

Tabela 6.9 - Resultados da 4ª campanha das medições de biogás nos drenos P8, P10 e P11 (26/08/2014 e 27/08/2014)

		P8							
		26-08-2014				27-08-2014			
		Manhã		Tarde		Manhã		Tarde	
Biogás	CH <sub>4</sub> (%)	33,7	30,5	56,9	52,6	21,1	32,4	35,2	36,4
	CO <sub>2</sub> (%)	23,3	20,3	31,7	23,3	7,9	14,8	12,2	11,2
	O <sub>2</sub> (%)	8,3	8,5	2,2	3,0	15,6	10,6	9,9	8,9

	Outros (%)	34,7	40,7	9,2	21,1	55,4	42,2	42,7	43,5
		<b>P10</b>							
		<b>26-08-2014</b>				<b>27-08-2014</b>			
		Manhã		Tarde		Manhã		Tarde	
<b>Biogás</b>	CH <sub>4</sub> (%)	25,9	46,0	61,5	58,9	52,1	48,5	48,0	44,0
	CO <sub>2</sub> (%)	16,5	28,4	28,6	32	37,9	35,1	27,7	24,6
	O <sub>2</sub> (%)	10,3	4,2	0,1	0,6	4,2	4,2	4,4	4,2
	Outros (%)	47,3	21,4	9,8	8,5	5,8	12,2	19,9	27,2
		<b>P11</b>							
		<b>26-08-2014</b>				<b>27-08-2014</b>			
		Manhã		Tarde		Manhã		Tarde	
<b>Biogás</b>	CH <sub>4</sub> (%)	22,1	56,6	42,5	41,2	5,4	4,2	33,6	27,4
	CO <sub>2</sub> (%)	14,8	34,4	22,6	19,8	4,7	4,6	15,6	13,5
	O <sub>2</sub> (%)	11,2	1,4	4,2	5,7	17,2	16,9	8,9	8,7
	Outros (%)	51,9	7,6	30,7	33,3	72,7	74,3	41,9	50,4

Relativamente aos valores obtidos na monitorização dos poços P8 (Figura 6.55), P10 (Figura 6.54) e P11 (Figura 6.56) na quarta campanha, observa-se uma elevada variabilidade.

Os poços P8 (Figura 6.55) e P10 (Figura 6.54), em alguns momentos da monitorização apresentam valores acima dos 50% de metano (CH<sub>4</sub>), no entanto os valores de oxigénio (O<sub>2</sub>), à exceção do poço P10 (Figura 6.54 C) dia 26/08/2014 à tarde (T1 e T2), situam-se acima dos 2% e abaixo dos 16%.

O poço P11 (Figura 6.56), sobre o qual se efetuou a intervenção na vala, apresentou valores muito distintos nos vários momentos da monitorização. Para além dos valores de metano (CH<sub>4</sub>) serem baixos, os valores de oxigénio (O<sub>2</sub>) são muito elevados, atingindo os 17%, aproximadamente. Este fenómeno tem uma análise complexa dado que se efetuou o carregamento da vala com lixiviado, mas uma vez que esta se encontrava coberta não foi possível observar o seu estado, ou seja, a ausência ou presença de água lixiviante.

No entanto, no dia 27/08/2014 recarregou-se as valas com água lixiviante, e suspeita-se que devido à presença da brita, a drenagem da água lixiviante será mais demorada e deste modo, a massa de resíduos demorará mais tempo a ficar húmida e, consequentemente a criar uma zona tampão, que impulse o aumento de metano (CH<sub>4</sub>) e a diminuição do oxigénio (O<sub>2</sub>).

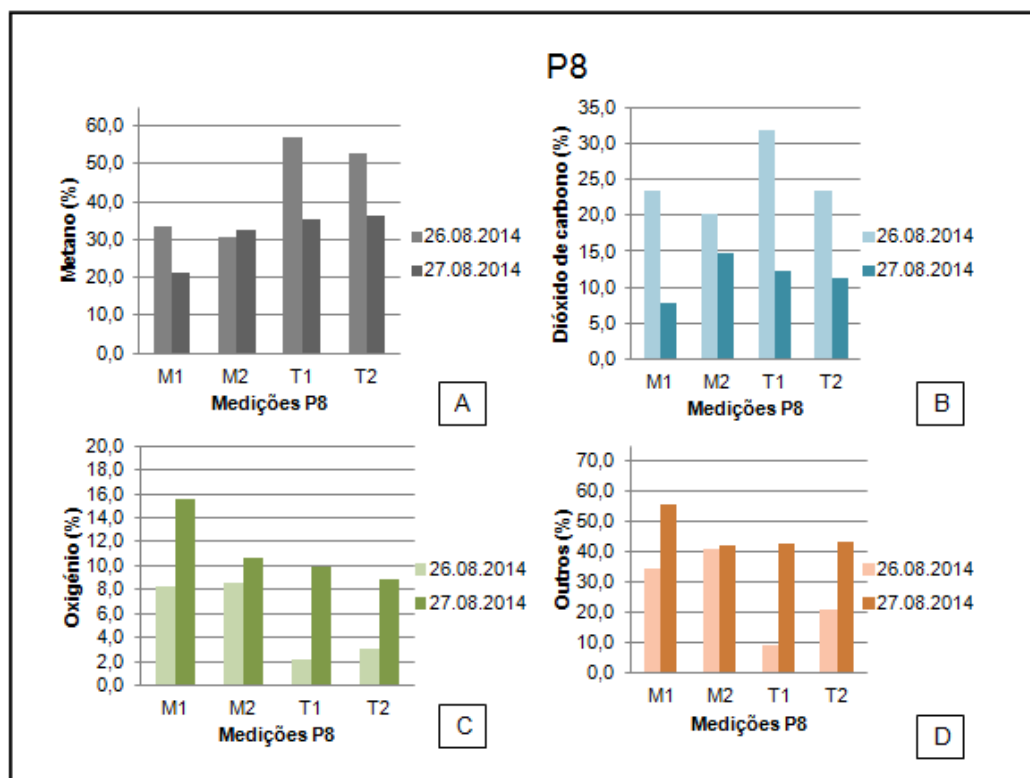


Figura 6.55 - Medições do biogás na 4ª campanha no poço P8. A- Percentagem de metano ( $\text{CH}_4$ ). B- Percentagem de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). C- Percentagem de oxigénio ( $\text{O}_2$ ). D- Percentagem de outros gases

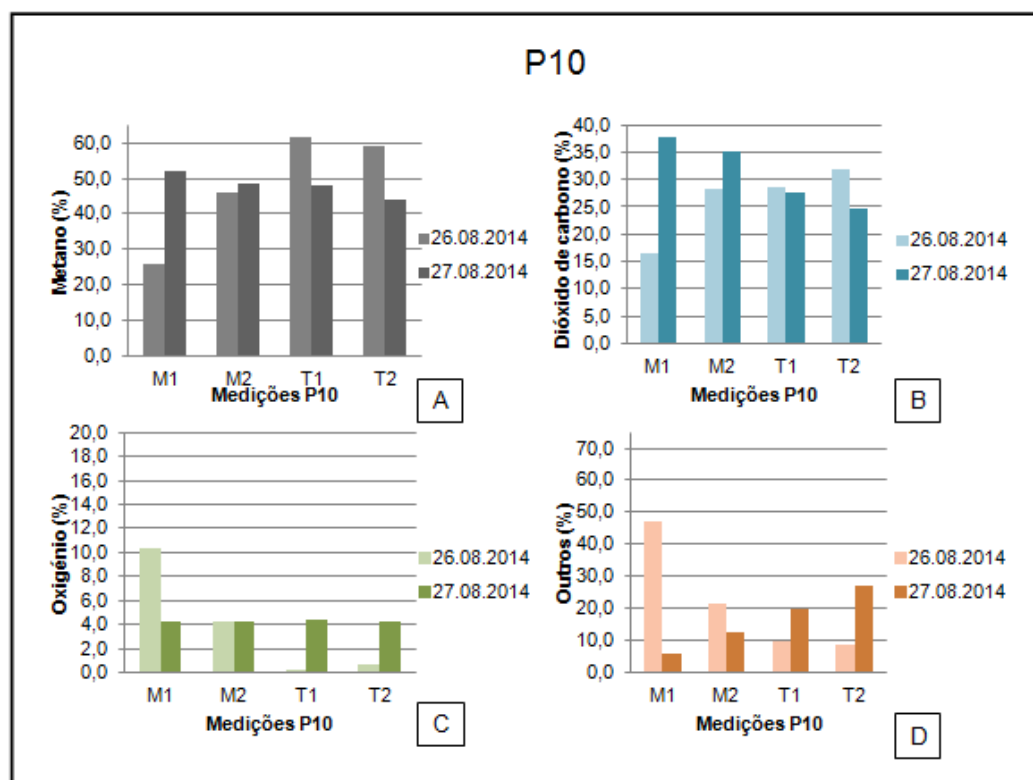


Figura 6.54 - Medições do biogás na 4ª campanha no poço P10. A- Percentagem de metano ( $\text{CH}_4$ ). B- Percentagem de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). C- Percentagem de oxigénio ( $\text{O}_2$ ). D- Percentagem de outros gases

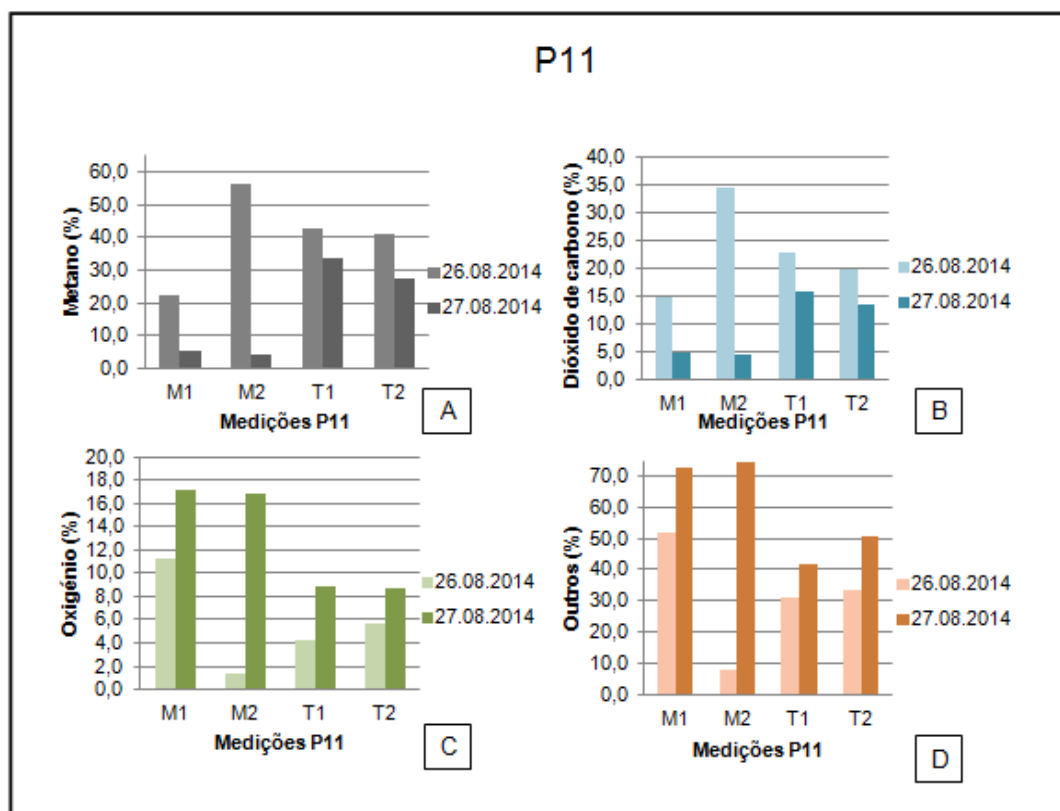


Figura 6.56 - Medições do biogás na 4ª campanha no poço P11. A- Percentagem de metano ( $\text{CH}_4$ ). B- Percentagem de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). C- Percentagem de oxigénio ( $\text{O}_2$ ). D- Percentagem de outros gases

Os gráficos da Figura 6.57, da Figura 6.58 e da Figura 6.59 mostram os valores médios diários percentuais obtidos pela monitorização dos poços de biogás (P8, P10 e P11) na 4ª campanha. Ao observar os gráficos, verifica-se um decaimento nos valores médios do biogás do primeiro para o segundo dia de monitorização, à exceção do poço P10 (Figura 6.58), onde os valores médios de metano ( $\text{CH}_4$ ) de oxigénio ( $\text{O}_2$ ) mantêm-se constantes.

Nos poços P8 (Figura 6.57) e P11 (Figura 6.59), a diminuição dos valores médios diários de metano ( $\text{CH}_4$ ), é acompanhada pelo aumento dos valores médios diários do oxigénio ( $\text{O}_2$ ) e da fração referente aos outros constituintes do biogás, assim como pela diminuição dos valores médios referentes ao dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).



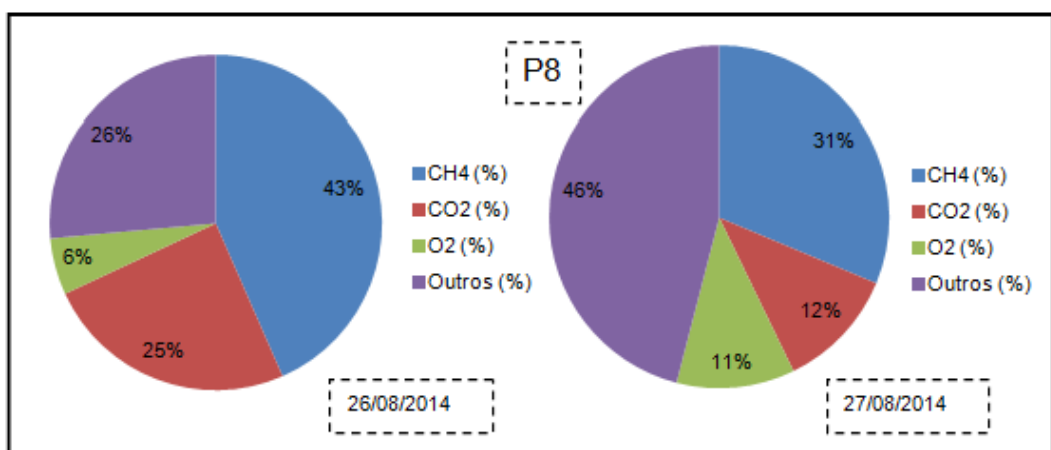


Figura 6.57 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P8 nos dias 26/08/2014 e 27/08/2014

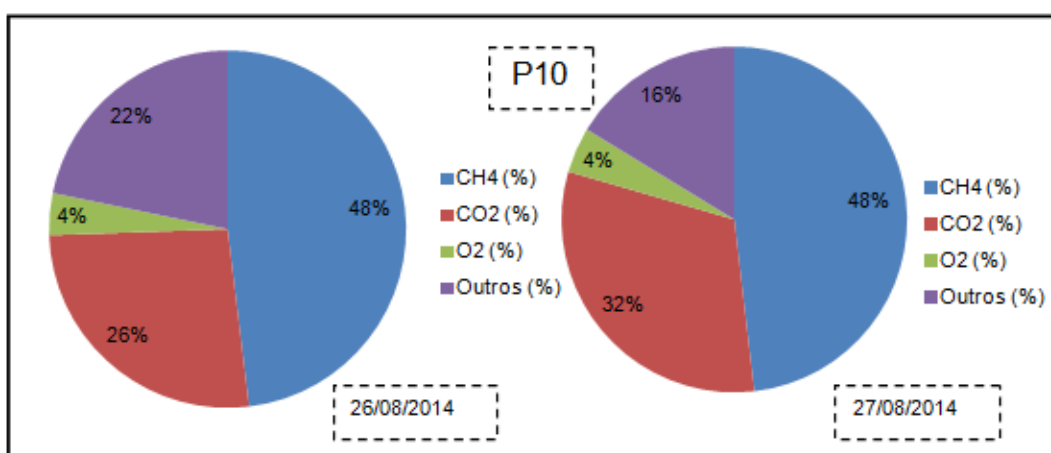


Figura 6.58 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P11 nos dias 26/08/2014 e 27/08/2014

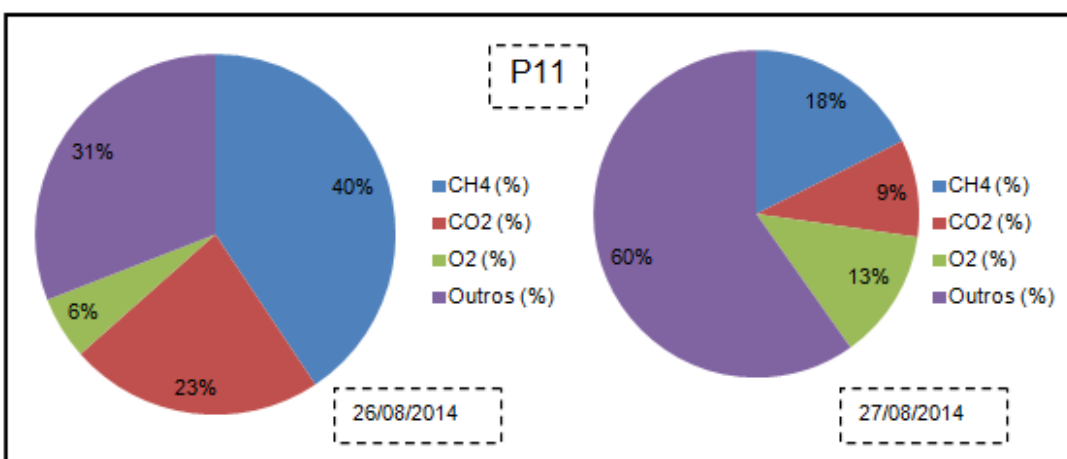


Figura 6.59 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P10 nos dias 26/08/2014 e 27/08/2014



## 6.5. Quinta Campanha

### 6.5.1.Célula B

A quinta campanha decorreu nos dias 16 e 17 de Setembro de 2014 e os trabalhos desenvolvidos foram uma continuação dos realizados nas campanhas anteriores. Nesta campanha as valas dos poços P1, P2 e P3 foram recarregadas nos dois dias de monitorização do biogás, efetuando-se medições no período da manhã e da tarde. Na Tabela 6.10 estão apresentados os valores obtidos na monitorização do biogás na quinta campanha na célula B.

Tabela 6.10 - Resultados da 5ª campanha das medições de biogás nos drenos P1, P2 e P3 (16/09/2014 e 17/09/2014)

		P1			
		16.09.2014		17.09.2014	
		Manhã	Tarde	Manhã	Tarde
Biogás	CH <sub>4</sub> (%)	64,8	55,8	60,3	53,1
	CO <sub>2</sub> (%)	40,4	36,2	40,4	32,9
	O <sub>2</sub> (%)	0,5	1,5	0,5	2,8
	Outros (%)	0,0*	6,5	0,0*	11,2
		P2			
		16.09.2014		17.09.2014	
		Manhã	Tarde	Manhã	Tarde
Biogás	CH <sub>4</sub> (%)	64,8	35,5	58,3	33,8
	CO <sub>2</sub> (%)	40,4	21,2	40,4	26,5
	O <sub>2</sub> (%)	0,5	9,4	0,5	8,6
	Outros (%)	0,0*	33,9	0,8	31,1
		P3			
		16.09.2014		17.09.2014	
		Manhã	Tarde	Manhã	Tarde
Biogás	CH <sub>4</sub> (%)	51,8	0,5	0,8	0,8
	CO <sub>2</sub> (%)	33	0,3	0,8	0,5
	O <sub>2</sub> (%)	3,3	20,7	18,9	19,8
	Outros (%)	11,9	78,5	79,5	78,9

\* Estes valores podem não corresponder ao real, devido a erros de leitura do aparelho utilizado

A Figura 6.60, a Figura 6.61 e Figura 6.62 representam sobre a forma de gráfico os valores obtidos nesta campanha. Ao analisar os gráficos verifica-se que a medição correspondente ao período da manhã do primeiro dia de monitorização da campanha é a que apresenta valores mais elevados, relativamente à percentagem de metano (CH<sub>4</sub>).

Também se observa que os valores de metano (CH<sub>4</sub>) apresentam uma diminuição do primeiro para o segundo dia de campanha, acompanhada pelo aumento de percentagem de oxigénio (O<sub>2</sub>). Nesta campanha destaca-se o comportamento do poço P3 (Figura 6.62), que apresenta valores de metano inferiores a 1% e de oxigénio, aproximadamente, de 20%. A componente correspondente a outros gases atinge cerca de 80%.

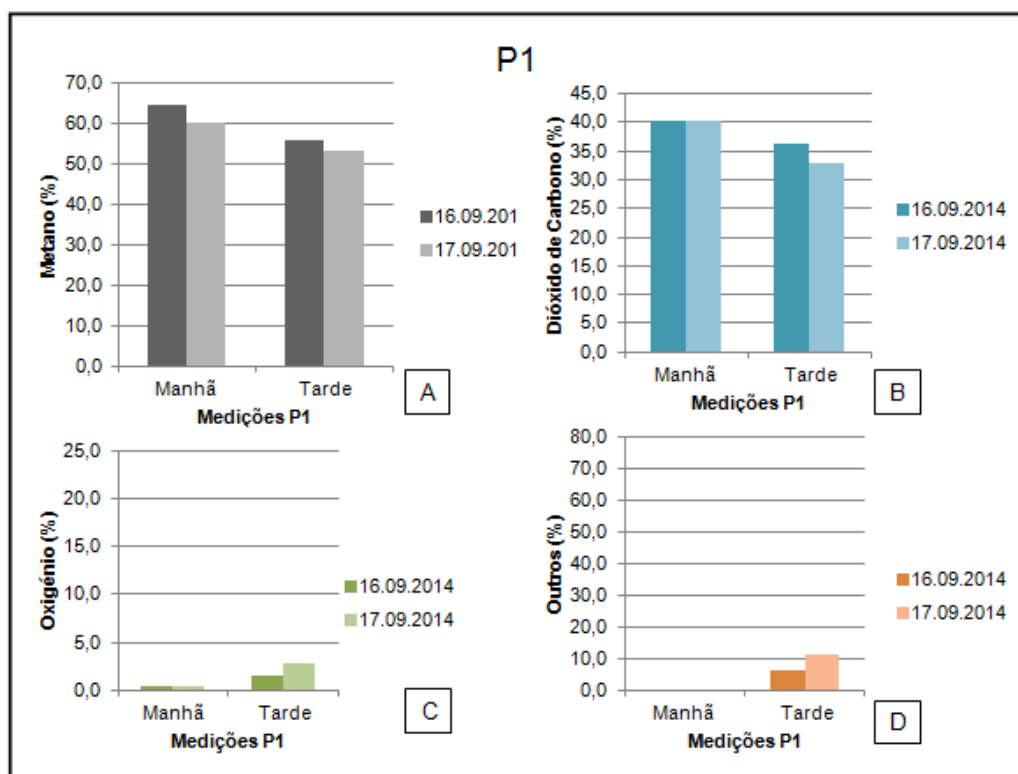


Figura 6.60 - Medições do biogás na 5ª campanha no poço P1. A- Percentagem de metano ( $\text{CH}_4$ ). B- Percentagem de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). C- Percentagem de oxigénio ( $\text{O}_2$ ). D- Percentagem de outros gases

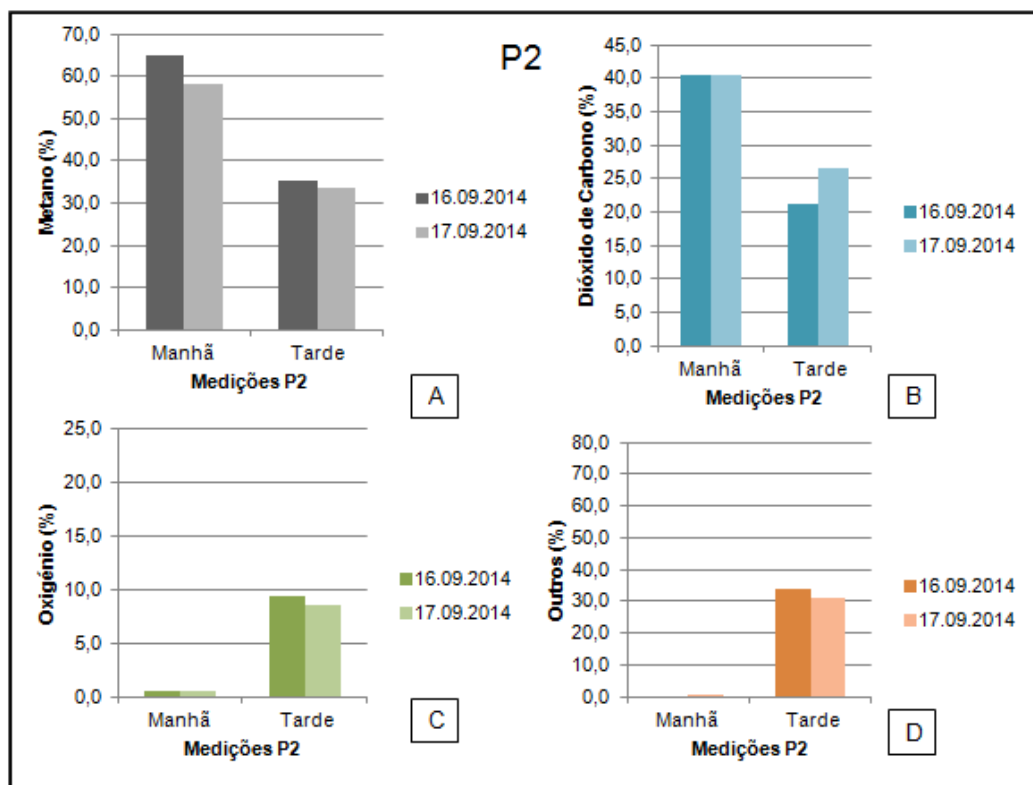


Figura 6.61 - Medições do biogás na 5ª campanha no poço P2. A- Percentagem de metano ( $\text{CH}_4$ ). B- Percentagem de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). C- Percentagem de oxigénio ( $\text{O}_2$ ). D- Percentagem de outros gases

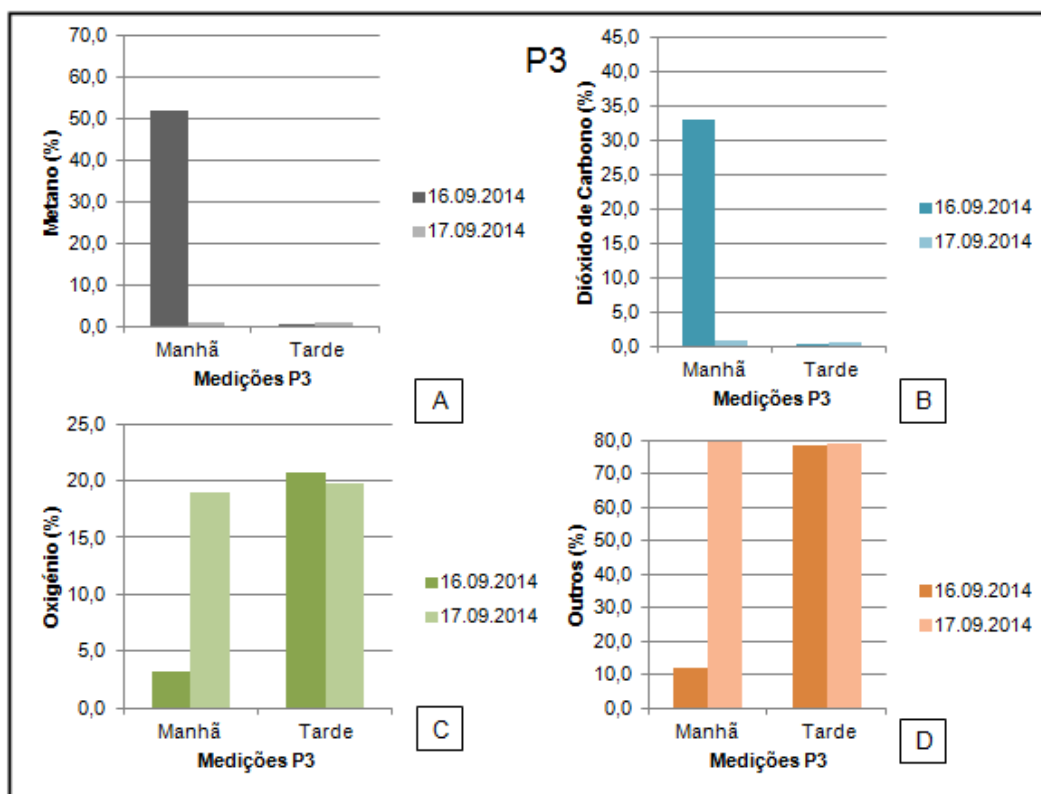


Figura 6.62 - Medições do biogás na 5ª campanha no poço P3. A- Percentagem de metano (CH<sub>4</sub>). B- Percentagem de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). C- Percentagem de oxigênio (O<sub>2</sub>). D- Percentagem de outros gases

Os gráficos da Figura 6.63, da Figura 6.64 e da Figura 6.65 mostram os valores médios diários percentuais obtidos pela monitorização dos poços de biogás P1, P2 e P3 na 5ª campanha. Ao observar os gráficos, verifica-se um decaimento nos valores médios do biogás do primeiro para o segundo dia de monitorização.

Nos valores médios percentuais relativos à monitorização do poço P1 (Figura 6.63), a diminuição do metano (CH<sub>4</sub>) é a mais acentuada, de 59% para 28%, assim como o aumento da percentagem de oxigênio presente, de 1% para 23%.

Relativamente ao poço P2 (Figura 6.64), os valores médios percentuais mantêm-se praticamente constantes, uma vez que os valores de metano (CH<sub>4</sub>) diminuem de 49% para 46% e o dióxido de carbono aumenta de 30% para 33%, sendo que o oxigênio e a componente relativa aos outros gases mantêm-se iguais, 5% e 16%, respetivamente.

O poço P3 (Figura 6.65) está praticamente inativo relativamente à produção de biogás. Devido aos valores obtidos, supõe-se que o primeiro valor na monitorização, correspondente ao período da manhã do primeiro dia da campanha, esteja camuflado pela acumulação de biogás na tubagem. Este poço foi sujeito às mesmas condições que o poço P1 e P2, no entanto existe algum fator externo que está a condicionar o seu comportamento, por exemplo, o tipo de resíduos depositados na sua área de influência.

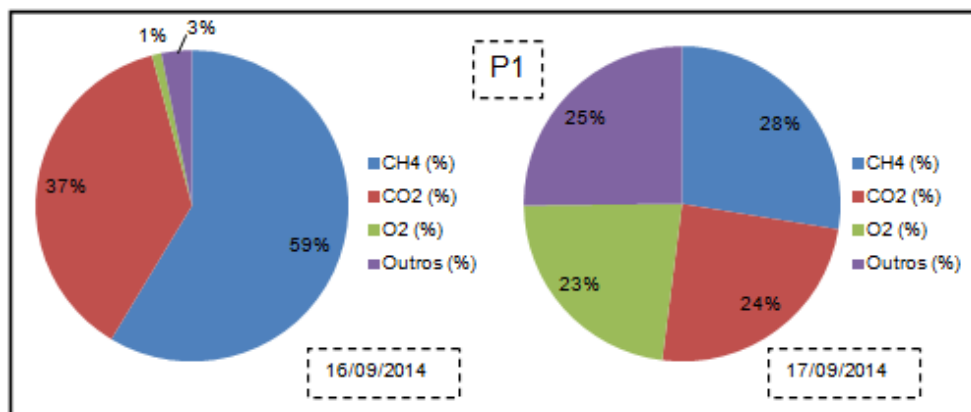


Figura 6.63 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P1 nos dias 16/09/2014 e 17/09/2014

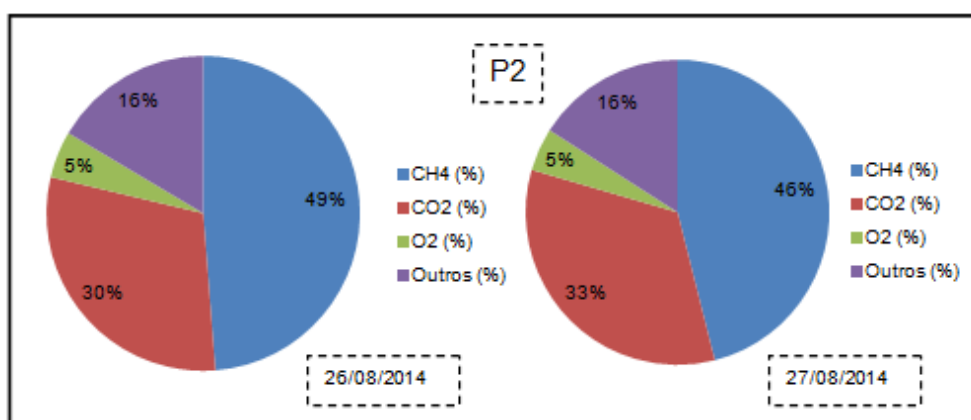


Figura 6.64 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P2 nos dias 16/09/2014 e 17/09/2014

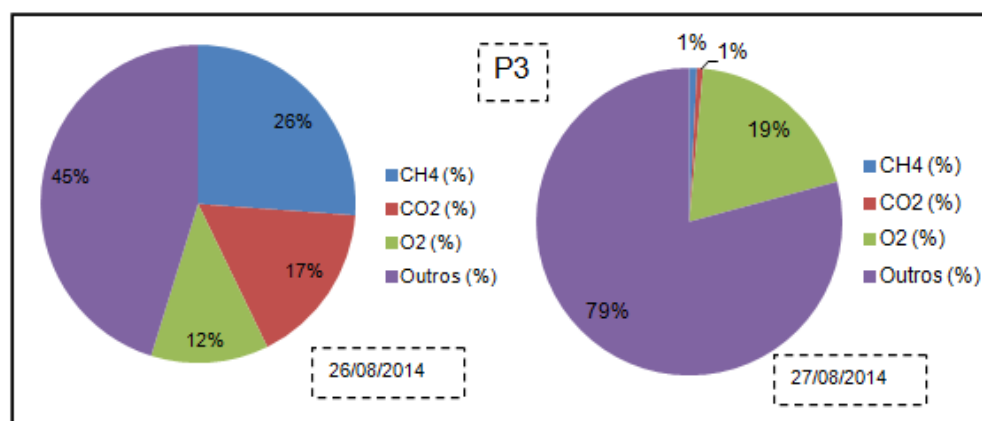


Figura 6.65 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P3 nos dias 16/09/2014 e 17/09/2014

### 6.5.2. Célula C

A quinta campanha decorreu nos dias 16 e 17 de Setembro de 2014 e os trabalhos desenvolvidos foram uma continuação dos realizados nas campanhas anteriores. Nesta

campanha as valas dos poços P8, P10 e P11 foram recarregadas nos dois dias de monitorização do biogás, efetuando-se medições no período da manhã e da tarde.

Na Tabela 6.11 estão apresentados os valores obtidos na monitorização do biogás na quinta campanha na célula C.

Tabela 6.11 - Resultados da 5ª campanha das medições de biogás nos drenos P8, P10 e P11 (16/09/2014 e 17/09/2014)

		P8			
		16.09.2014		17.09.2014	
		Manhã	Tarde	Manhã	Tarde
Biogás	CH <sub>4</sub> (%)	58,7	26,6	52,4	42,5
	CO <sub>2</sub> (%)	35,9	30,7	35,5	33,7
	O <sub>2</sub> (%)	1,9	8,7	2,3	3,5
	Outros (%)	3,5	34,0	9,8	20,3
		P10			
		16.09.2014		17.09.2014	
		Manhã	Tarde	Manhã	Tarde
Biogás	CH <sub>4</sub> (%)	59,8	26,7	55,2	44,3
	CO <sub>2</sub> (%)	37,4	32,8	37,0	38,5
	O <sub>2</sub> (%)	1,4	10,2	1,5	2,8
	Outros (%)	1,4	30,3	6,3	14,4
		P11			
		16.09.2014		17.09.2014	
		Manhã	Tarde	Manhã	Tarde
Biogás	CH <sub>4</sub> (%)	59,8	15,2	41,2	28,7
	CO <sub>2</sub> (%)	37,4	28,4	24,8	32,8
	O <sub>2</sub> (%)	1,4	10,6	7,6	10,6
	Outros (%)	1,4	45,8	26,4	27,9

Os valores apresentados na tabela são suportados pelos gráficos apresentados na Figura 6.66, na Figura 6.67 e na Figura 6.68. Ao observar os gráficos constata-se que a qualidade do biogás diminui da manhã para tarde, assim, como do primeiro dia para o segundo dia da campanha.

Os poços P8 (Figura 6.66), P10 (Figura 6.67) e P11 (Figura 6.68) apresentam comportamento semelhante, apesar de algumas oscilações nos valores dos constituintes do biogás. No entanto, em todos os poços, a diminuição da percentagem de metano (CH<sub>4</sub>) é acompanhada pelo aumento da percentagem de oxigénio (O<sub>2</sub>).

Relativamente ao poço P11 (Figura 6.68), no primeiro dia de campanha, o metano (CH<sub>4</sub>) apresenta uma diminuição de 33%, aproximadamente. Este comportamento pode ser causado pelo facto da vala já não encontrar com lixiviado no momento da monitorização.

A diferença nos valores obtidos pode estar relacionada com a velocidade de drenagem do lixiviado em cada vala, uma vez que as três foram recarregadas em simultâneo e no primeiro momento de monitorização os valores não apresentam diferenças significativas.

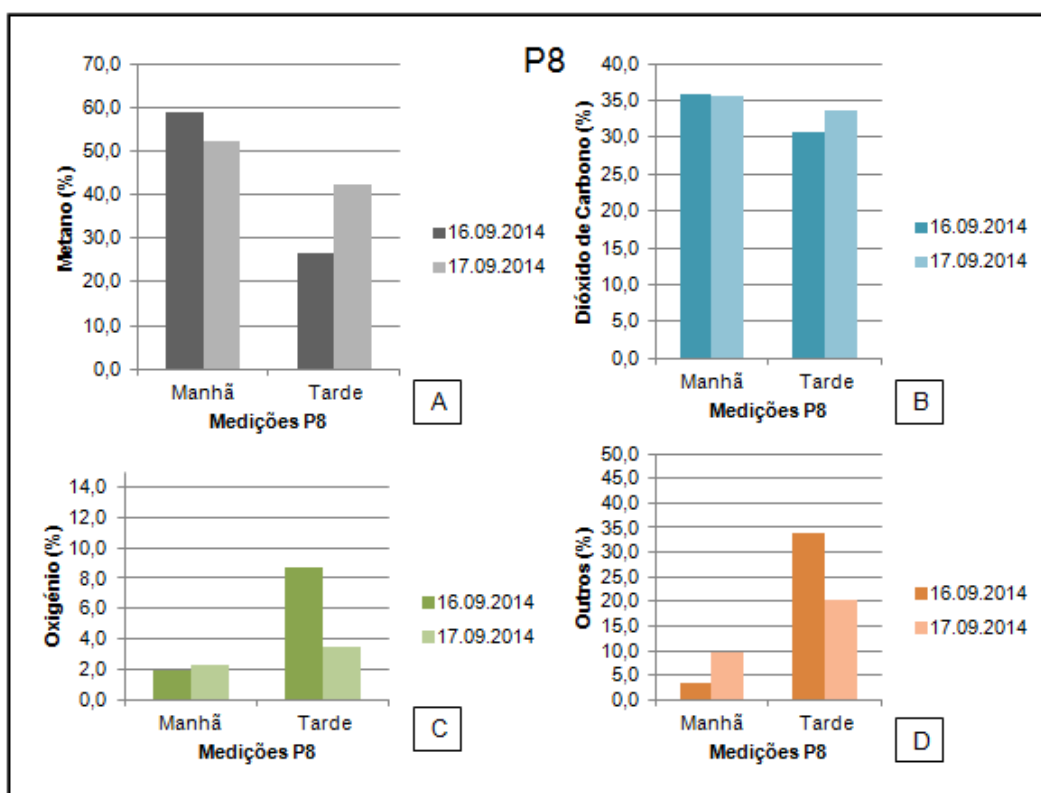


Figura 6.66 - Medições do biogás na 5ª campanha no poço P8. A- Percentagem de metano ( $\text{CH}_4$ ). B- Percentagem de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). C- Percentagem de oxigénio ( $\text{O}_2$ ). D- Percentagem de outros gases

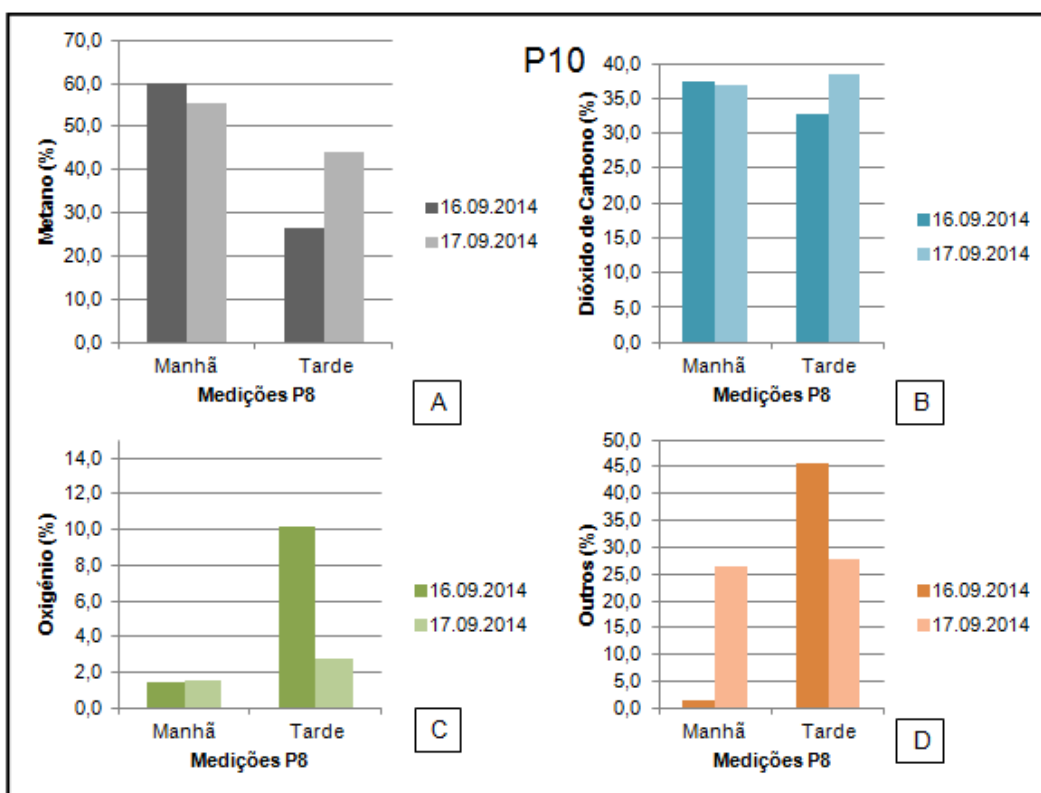


Figura 6.67 - Medições do biogás na 5ª campanha no poço P10. A- Percentagem de metano ( $\text{CH}_4$ ). B- Percentagem de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). C- Percentagem de oxigénio ( $\text{O}_2$ ). D- Percentagem de outros gases

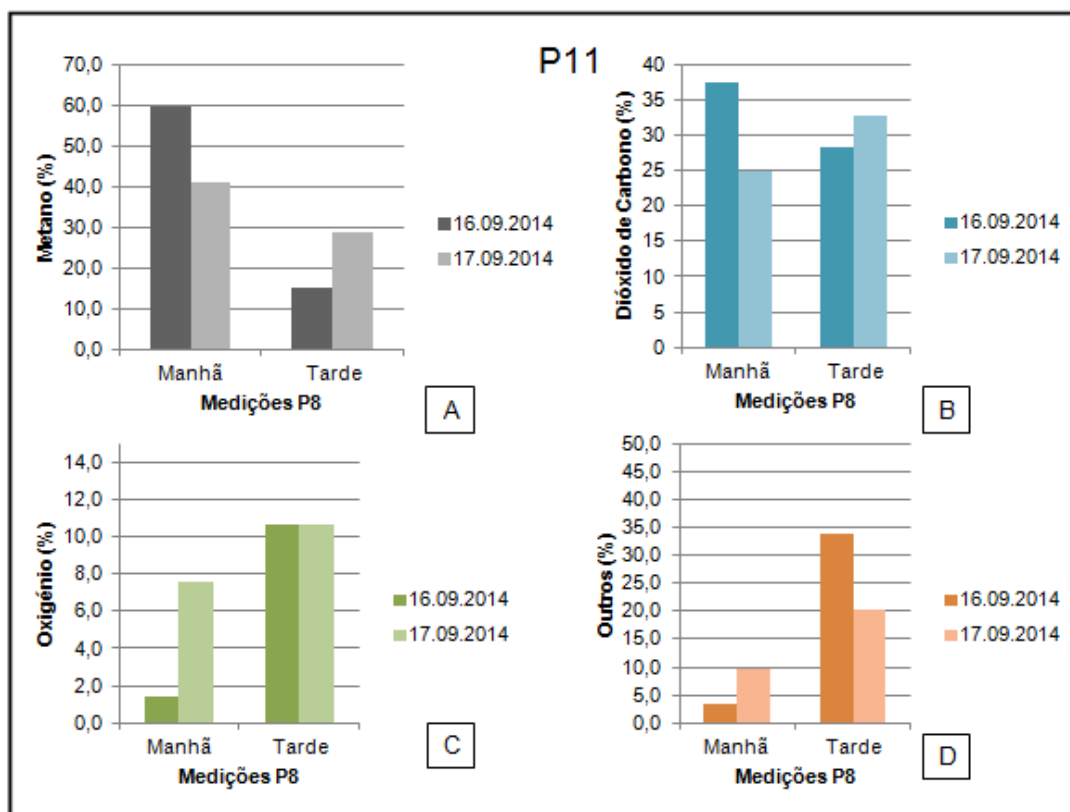


Figura 6.68 - Medições do biogás na 5ª campanha no poço P11. A- Percentagem de metano ( $\text{CH}_4$ ). B- Percentagem de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). C- Percentagem de oxigênio ( $\text{O}_2$ ). D- Percentagem de outros gases

Os gráficos da Figura 6.69, da Figura 6.70 e da Figura 6.71 mostram os valores médios diários percentuais obtidos pela monitorização dos poços de biogás P8, P10 e P11 na 5ª campanha.

Ao analisar os gráficos, verifica-se que em termos médios os valores do segundo dia de campanha revelam melhor qualidade do biogás, à exceção do poço P11 (Figura 6.71), em que se verifica uma ligeira diminuição.

Estes resultados podem revelar que apesar de os valores no primeiro dia terem apresentado um máximo superior, depois diminuíram muito. Sendo que no segundo dia de monitorização a qualidade média do biogás foi superior, no entanto não ultrapassa o valor médio de 50% de metano ( $\text{CH}_4$ ), o que também não corresponde a valores de qualidade de biogás muito favoráveis ao seu aproveitamento energético, pois o elevado PCI do biogás deve-se sobretudo ao elevado teor de metano ( $\text{CH}_4$ ).

Comparando com os resultados obtidos na quarta campanha, verifica-se que, em termos médios, a qualidade do biogás melhorou. Esta melhoria, supõe-se que esteja intimamente relacionada com a precipitação que ocorreu neste período de tempo e com a diminuição da temperatura ambiente.

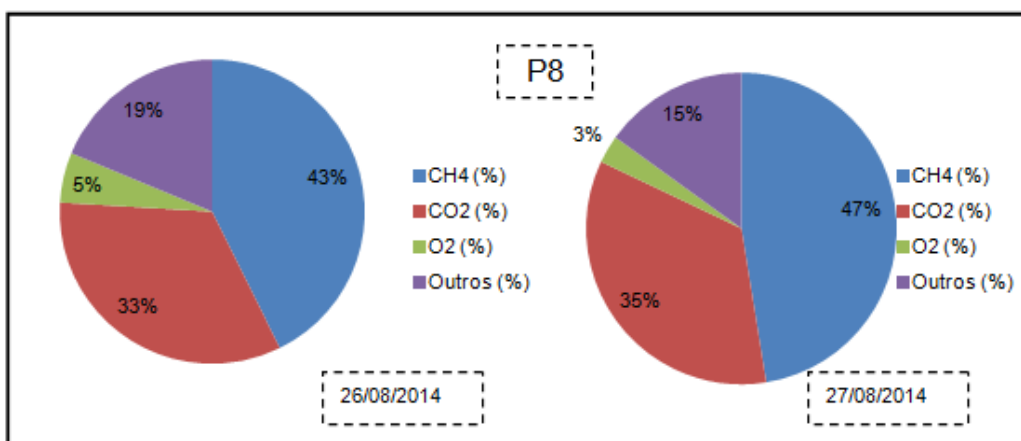


Figura 6.69 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P8 nos dias 16/09/2014 e 17/09/2014

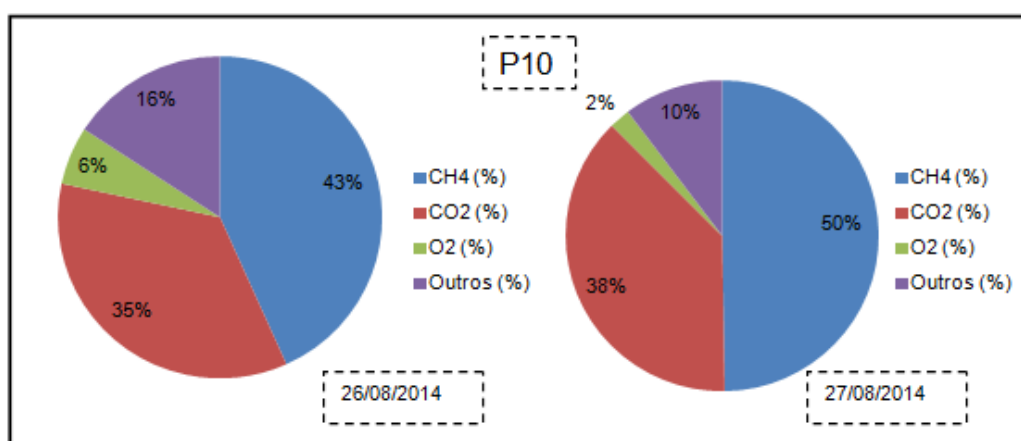


Figura 6.70 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P10 nos dias 16/09/2014 e 17/09/2014

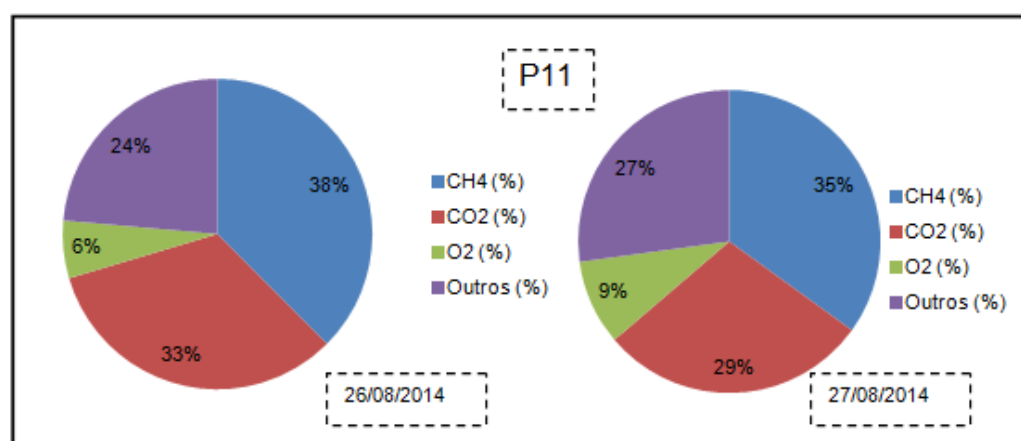


Figura 6.71 - Valores médios diários percentuais da monitoriação do poço P11 nos dias 16/09/2014 e 17/09/2014



## 7. DISCUSSÃO - CAMPANHAS REALIZADAS

Os resultados obtidos no ensaio de resistividade elétrica, através das perfurações efetuadas (P1, P2 e P3), apresentaram uma correlação ajustada com a realidade previsível na célula B do aterro sanitário do Barlavento mas inferior ao expectável. Este fato também pode estar relacionado com o desfasamento temporal entre o momento da realização dos ensaios de resistividade elétrica (Fevereiro 2014) e o momento da realização das perfurações (Junho 2014). Isto, porque as condições climáticas diferem nos dois momentos e também, porque ao longo do tempo foi drenada água lixiviante. Estes fatores podem ter influenciado a quantidade de lixiviado contida na célula B no momento das perfurações.

A drenagem da água lixiviante tem impacte nas condições de humidade da massa de resíduos, uma vez que a massa passa a estar com teor de humidade significativa e não saturada em lixiviado. As condições de humidade, cerca de 70%, são ideais ao processo de degradação da matéria orgânica e à ação das baterias que intervêm no processo de produção de biogás.

Neste sentido especula-se, que caso a massa de resíduos estivesse saturada em lixiviado no momento dos ensaios de resistividade elétrica, como sugerem os resultados obtidos nos trabalhos de campo, ao drenar o lixiviado entre os dois momentos o nível terá baixado e, as perfurações efetuadas (16 m) não terão atingido as zonas saturadas (profundidade na ordem dos 35m).

Outro aspeto relevante na avaliação e discussão dos resultados obtidos no ensaio de resistividade elétrica é que as características dos resíduos depositados no aterro sanitário, nomeadamente, as características físicas dos materiais poderão ter influenciado os resultados e a interpretação efetuada não leva em linha de conta este aspeto. Os materiais depositados ao apresentarem características físicas líquidas ou semi-líquidas, como é o caso das lamas encontradas nas perfurações (em média cerca de 60% de humidade), podem justificar os valores de resistividade elétrica obtidos no ensaio e, que se consideraram numa primeira interpretação corresponderem a água lixiviante, abaixo dos 5 ohm.m.

Relativamente à monitorização dos poços tanto da célula B como da célula C, os valores obtidos sugerem que o aterro encontra-se na fase Metanogénica, no entanto em certos momentos das campanhas realizadas este facto não se revelou tão evidente, já que se obtiveram valores de metano (CH<sub>4</sub>) abaixo dos 40% e muitos valores de oxigénio acima do 1%.

No decorrer das campanhas realizadas tentou-se perceber quais os fatores que poderiam estar a influenciar os resultados que se obtiveram. Da observação efetuada constatou-se que:

- É fundamental manter a superfície terrosa com um teor de humidade que garanta um grau de plasticidade dos solos silto-argilosos utilizados naquela cobertura. Esta condição nos solos argilosos permite tamponar a entrada de oxigénio (durante a depressão interna promovida pela extração do biogás) e evita a saída do metano produzido na massa de resíduos. Conclui-se que é muito importante ter em atenção as

caraterísticas de plasticidade dos solos da camada de cobertura final da massa de resíduos, de modo a permitir condições de anaerobiose no interior da massa de resíduos depositados. Este facto foi evidenciado através da monitorização efetuada após as diversas recargas que se efetuaram com água lixiviante nas valas executadas em volta dos poços de biogás adotados para este estudo, onde se verificou que os valores obtidos de metano aumentaram e os valores de oxigénio diminuíram.

Verificou-se também, que:

- Quando a água lixiviante é totalmente drenada e a superfície começa a perder o teor de humidade, os valores tendem a alterar-se, nomeadamente, a percentagem de metano decresce e a de oxigénio aumenta. Estas alterações estão relacionadas com a inexistência de uma camada de impermeabilização do topo, ou a referida falta de plasticidade nos solos (abrindo fendas) o que permite a ocorrência de trocas de oxigénio e metano entre o interior e o exterior da célula.

Durante as campanhas e no decorrer dos trabalhos práticos, constatou-se que existe um número muito elevado de variáveis que tendem afetar a qualidade do biogás monitorizado, nomeadamente:

- O funcionamento dos motores,
- A abertura das válvulas e,
- As condições climáticas, pois a temperatura é determinante no teor de humidade. Nos dias muito quentes constatou-se que o teor de humidade diminuiu acentuadamente, pois mesmo recarregando as valas executadas junto aos poços da célula B e C o seu efeito na humidade dos resíduos foi de curta duração.

A influência daquelas variáveis evidenciaram-se nos valores de biogás monitorizado. Com efeito na penúltima campanha realizada (onde a temperatura ambiente foi a mais elevada), os valores monitorizados apresentaram menor qualidade do biogás, com menos teor em metano e mais teor em oxigénio porque as válvulas estavam mais abertas que em campanhas anteriores. Com efeito a abertura das válvulas é determinante uma vez que se a válvula estiver demasiado aberta, se a percentagem de metano no biogás não for suficiente para manter a combustão, começa a puxar oxigénio e o risco de explosão pode ocorrer se o sistema de paragem não ativar.

Por outro lado quando os motores interrompem o seu funcionamento, verifica-se que, pelo fato de se passar a ter maior acumulação de biogás nas células (falta de extração), permite que após o arranque do motor este disponha de um biogás mais rico em metano passando a funcionar normalmente mas com menor caudal de aspiração. Durante a paragem a acumulação que se produz na massa de resíduos permite que os valores de metano aumentem.

A quantidade de biogás produzida não está diretamente relacionada com a qualidade do biogás monitorizado, pois verificou-se que apesar, do elevado potencial de produção de biogás, a qualidade pode ser muito reduzida, o que condiciona o seu aproveitamento energético, uma vez que afeta o funcionamento dos motores da unidade de valorização energética de biogás.

Relativamente à qualidade do biogás a levar ao motor, o trabalho de controlo e monitorização efetuado diariamente no aterro é determinante para a sua qualidade. É necessário corrigir a abertura ou fecho das válvulas consoante os valores monitorizados, ou seja, de acordo com o desempenho de cada poço. De uma forma simplificada, se os valores monitorizados apresentarem elevada percentagem de oxigénio, deve-se diminuir a abertura das válvulas, por outro lado se os valores apresentarem baixa percentagem de oxigénio e elevada percentagem de metano (> 50%) devem-se abrir as válvulas.

O oxigénio afeta a produção e a qualidade de biogás, portanto se os valores monitorizados numa válvula apresentarem elevada percentagem de oxigénio e se a abertura da válvula não for corrigida, vai influenciar a qualidade do biogás que está a chegar aos motores da UVEB. Consequentemente, estes interrompem o seu funcionamento e não há aproveitamento energético do biogás produzido no aterro.

As paragens dos motores ocorrem sempre que a percentagem de metano presente no biogás se situa abaixo dos 40%. Com efeito, devido ao baixo teor em metano o PCI do biogás diminui e se os motores continuarem em funcionamento têm de efetuar uma aspiração muito elevada de biogás para produzir a mesma quantidade de energia.

Na terceira campanha, em que o objetivo principal era aferir o comportamento dos poços em estudo após a inativação dos restantes num raio de 20m, concluiu-se que:

- Esta alteração, através das medições efetuadas durante os dias de campanha, não teve efeito notório no desempenho dos poços em estudo. No entanto, através do acompanhamento realizado no decorrer dos trabalhos de campo, ao proceder à inativação dos poços referenciados, constatou-se que alguns já se encontravam inativos, devido aos valores que apresentaram em medições efetuadas anteriormente (elevada percentagem de oxigénio). Deste modo, conclui-se que, apesar do elevado número de poços existentes, principalmente na célula B, muitos encontram-se inativos pelo que não têm influência no processo de produção e extração de biogás.

Na quarta campanha, adicionou-se uma variável ao poço P11 da célula C, ou seja a vala executada em volta do mesmo foi cheia com brita e coberta com geomembrana, com o objetivo de se avaliar a qualidade do biogás e perceber o impacto desta variável. Analisando os valores monitorizados, verificou-se que:

- A qualidade do biogás diminuiu pelo fato de a colocação da brita, formando um poço de brita, ter proporcionado o aumento da quantidade de oxigénio no interior da vala. Deduz-se que resultou do mau isolamento da envolvente de brita, pois a de cobertura da geomembrana não ficou amarrada devidamente nem foi colocado contrapeso,

permitindo eventualmente a puxar o oxigénio do ar atmosférico pela depressão criada internamente.

Comparando os valores obtidos nas várias campanhas realizadas (2ª, 3ª e 4ª) e através de uma análise geral verificou-se que o biogás apresentou um comportamento irregular ao longo do trabalho realizado. Este comportamento supõe-se que esteja intimamente relacionado com as oscilações das condições externas a que a massa de resíduos está sujeita.

Na quarta campanha, adicionou-se uma variável ao poço P11 da célula C, ou seja a vala executada em volta do mesmo foi cheia com brita e coberta com geomembrana, com o objetivo de se avaliar a qualidade do biogás e perceber o impacte desta variável. Analisando os valores monitorizados, verificou-se que:

- A qualidade do biogás diminuiu pelo fato de a colocação da brita, formando um poço de brita, ter proporcionado o aumento da quantidade de oxigénio no interior da vala. Deduz-se que resultou do mau isolamento da envolvente de brita, pois a de cobertura da geomembrana não ficou amarrada devidamente nem foi colocado contrapeso, permitindo eventualmente a puxar o oxigénio do ar atmosférico pela depressão criada internamente.

## 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 8.1. Síntese

O aterro sanitário do Barlavento, apesar dos problemas que tem vindo a enfrentar no que se refere ao aproveitamento energético do biogás, este aproveitamento do biogás tem um impacto ambiental positivo muito elevado no que se refere às emissões de carbono e metano evitadas por injeção de energia na rede elétrica. Desde 2005, estima-se que o valor destas emissões evitadas se situe em 23.485.487 ton CO<sub>2</sub> eq.

A aplicação inovadora do ensaio de resistividade elétrica foi muito vantajosa e importante do ponto de vista da aplicação específica do ensaio, uma vez que se revelou ser um ensaio que se pode aplicar para avaliação prévia das condições existentes. No entanto, considera-se necessário existir um conhecimento mais profundo das características dos resíduos depositados, nomeadamente, os valores de resistividade elétrica dos materiais, para que a análise dos valores obtidos no ensaio seja mais crítica neste aspeto e, não se considere ser tudo lixiviado ou a massa de resíduos esteja saturada deste, uma vez que esta conclusão foi visível durante as observações realizadas sobre os resíduos retirados nas perfurações (por Trado) efetuadas sobre a massa de resíduos da célula B.

As campanhas realizadas também permitiram concluir que as condições da camada de cobertura da massa de resíduos afetam diretamente a qualidade de biogás, ou seja, ao manter a camada de cobertura húmida, criam-se zonas tampão, que impedem a troca de gases. O facto de o biogás (metano) não se escapar para atmosfera, possibilita a sua acumulação no interior de massa de resíduos, proporcionando o aumento do valor do PCI do biogás que está a chegar ao motores, e consequentemente, o aumento do seu poder energético, e consequentemente benefícios enormes ambientais pela redução das emissões de GEE.

Conclui-se que o estudo realizado foi relevante e inovador pela utilização do método de resistividade elétrica sobre a massa de resíduos do aterro sanitário, já que é um método que em regra é apenas utilizado no domínio geotécnico para avaliação das condições do solo. Esta intervenção inovadora permitiu aumentar o conhecimento das condições da massa de resíduos de uma forma não intrusiva ajudando de imediato (após a leitura “on line” dos seus resultados em computador) a traçar um plano de ações complementares. De fato, com aquela avaliação foram de seguida equacionadas e estudadas um conjunto de ações para avaliar da melhor forma como incrementar a produção de biogás e consequente, o aproveitamento energético e a redução das emissões gasosas de GEE's.

Essas ações e medidas aplicadas na massa dos resíduos bem como os ensaios realizados, eliminaram algumas hipóteses inicialmente consideradas e evidenciaram outras, nomeadamente, a necessidade de melhoria das condições da camada de cobertura da célula B (que se considera ser a maior limitação ao incremento da produção de biogás) e uma maior

monitorização dos poços de captação (abertura/fecho de válvulas) bem como se constatar que a grande proximidade dos poços de drenagem (elevado nº de poços com raio de influencia curto entre eles) pode influenciar de forma negativa a depressão interna e o rápido esgotar de biogás que, entretanto se gera diminuindo a capacidade de geração do metano.

## **8.2. Limitações**

A principal limitação ao desenvolvimento deste estudo foi o fato de não ser possível, face ao tempo para a elaboração da dissertação, aumentar o nº de alinhamentos dos ensaios de resistividades, desenvolvendo-se os ensaios e o estudo apenas numa área piloto definida previamente.

No entanto, pode-se especular que este método revela-se importante pois permite desde logo ter como que uma radiografia da massa de resíduos ao nível da humidade existente, bem como nos dá indicação das zonas mais secas e/ou de maior consistência de resíduos ainda em decomposição ou, na falta desta.

Assim a limitação que este método de resistividade elétrica nos introduziu, foi o de não se ter conseguido de conjugar um maior número de resultados com mais intervenções complementares associadas a perfurações por meios mecânicos para confirmar as conclusões retiradas. Um fato não pode ser renegado, ou seja, estas intervenções complementares tiveram desde logo por base as indicações retiradas naquele método inovador neste meio, permitindo assim ponderar o grau de intervenção e as ações a desenvolver.

Paralelamente o desconhecimento das condições de deposição e tipo de resíduos depositados na célula B do Aterro Sanitário do Barlavento (uma vez que esta já se encontra encerrada), também poderá ter sido uma limitação pois a interpretação dos resultados dos ensaios de resistividade elétrica poderiam ser analisados sobre outras componentes (resíduos inertes, resíduos de demolição e construção, lamas, etc...depositados no aterro).

Neste contexto também o período de monitorização das campanhas e da avaliação dos resultados sobre os procedimentos de abertura e fecho das válvulas e paragem dos motores ao longo do tempo deveria ter sido mais prolongado para se perceber melhor os efeitos que provocavam ou provocavam. No entanto devido ao tempo para a realização deste estudo em parceria com os trabalhos que se tiveram de desenvolver no campo, não foi possível.

## **8.3. Desenvolvimentos Futuros**

O desenvolvimento de estudos futuros no Aterro Sanitário do Barlavento, não sendo possível aprofundar o conhecimento do tipo de resíduos depositados na célula B deste aterro, uma vez que esta já se encontra encerrada, considera-se importante e interessante aplicar novamente o ensaio de resistividade elétrica segundo os mesmos alinhamentos e também incrementando a

área de avaliação, de forma a perceber a evolução das condições da célula B, em estudos futuros.

Também se considera importante e, se for possível, através de equipamento adequado, realizar perfurações com maior profundidade para deste modo abranger a profundidade de observação e validação dos resultados, ou seja, se a massa de resíduos deixou de estar saturada em lixiviado devido à sua drenagem ou se não esteve de todo saturada em lixiviado e as características dos resíduos depositados (humidade inferior) mascararam os resultados é importante.

Relativamente às campanhas, recomenda-se que em estudos futuros, se realizem durante um período de tempo superior, para desta forma avaliar com mais pormenor as variações que se observam na qualidade do biogás, em consonância com as variáveis existentes e referidas neste estudo.

Considera-se também de elevada importância (em outras intervenções em diferentes aterros sanitários) ser analisada a camada de cobertura e taludes do aterro, para deste modo serem avaliadas as suas condições e assim, ajustar as suas características à função de barreira à saída do biogás para o exterior para garantir o objetivo da sua contenção no interior da massa de resíduos bem como, avaliar e correlacionar o espaçamento ideal para a colocação dos drenos do biogás.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALGAR, Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos, S.A., <http://www.algar.com.pt/pt/>, consultado de Março a Julho de 2014
- ALGAR, Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos, SA (2010), Relatório Ambiental Anual do Aterro Sanitário do Barlavento Algarvio - 2009 (RAA ASB)
- ALGAR, Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos, SA (2011), Relatório Ambiental Anual do Aterro Sanitário do Barlavento Algarvio - 2010 (RAA ASB)
- ALGAR, Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos, SA (2012), *Manual de Instruções de Trabalho da Unidade de Valorização Energética do Biogás Produzido no Aterro Sanitário de Barlavento - Manual 03* (6ª Ed.)
- ALGAR, Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos, SA (2012), Relatório Ambiental Anual do Aterro Sanitário do Barlavento Algarvio - 2011 (RAA ASB)
- ALGAR, Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos, SA (2013), Relatório Ambiental Anual do Aterro Sanitário do Barlavento Algarvio - 2012 (RAA ASB), Direção de Atividade Complementares
- Associação Portuguesa de energias renováveis (APREN) (2012), Anuário APREN 2012
- Audebert, M., Clément, R., Grossin-Debattista, J., Günther, T., Touze-Foltz, N. e Moreau, S. (2014), *Influence of the geomembrane on time-lapse ERT measurements for leachate injection monitoring*, Waste Management, 34, pág. 780–790
- Barros, R., Filho, G. e Silva, T. (2014), *The electric energy potential of landfill biogas in Brazil*, Energy Policy, 65, pág. 150–164
- Barros, R., Filho, G. e Silva, T. (2014), *The electric energy potential of landfill biogas in Brazil*, Energy Policy, 65, pág. 50–164
- BENARD, J. (2003), *Short Note on the Depth of Investigation of Electrical Methods*, IRIS Instruments, Orleans, France (<http://www.iris-instruments.com> - consultado a 25/06/2014)
- Cabeça, A. e Levy, J. (2006), *Resíduos Sólidos Urbanos - Princípios e processos* (1ª Ed.), AEPSA - Associação das Empresas Portuguesas para o Setor do Ambiente
- Martinho, G., Gonçalves, M. e Silveira, A. (2011), *Gestão Integrada de Resíduos*, Universidade Aberta
- Cabeças, A. (24 a 26 Outubro 2011). Centros Eletroprodutores de Biogás no Universo EGF - Apresentação da Calibração do modelo teórico com base em dados de campo. 7ª Jornadas Técnicas Internacionais de Resíduos. Instituto Superior de Engenharia do Porto
- Calabrò, P., Sbaffoni, S., Orsi, S., Gentili, E. e Meoni, C. (2010), *The landfill reinjection of concentrated leachate: Findings from a monitoring study at an Italian site*, Journal of Hazardous Materials, 181, pág. 962–968



Carlo, L., Perri, M., Caputo, M., Deiana, R., Vurro, M. e Cassiani, G. (2013), *Characterization of a dismissed landfill via electrical resistivity tomography and mise-à-la-masse method*, Journal of Applied Geophysics, 98, pág. 1–10

Dam, R. (2012), *Landform characterization using geophysics—Recent advances, applications, and emerging tools*, Geomorphology, 137, pág. 57–73

Decreto-lei n.º 183/2009 de 10 de Agosto, Diário da República, n.º 153/2009, 1ª Serie, Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e Desenvolvimento Regional

Decreto-lei n.º 73/2011 de 17 de Junho, Diário da República, n.º 116/2011, 1ª Serie, Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território

Despacho n.º17313/2008 de 26 de Junho de 2008. Diário da República N.º122 - 2ª série. Ministério da Economia e da Inovação

EDP - Energias de Portugal. Consultado em 11 de Julho de 2014, em <http://www.edpsu.pt/pt/origemdaenergia/Pages/OrigensdaEnergia.aspx>

Fodor, Z. e Klemeš, J. (2012), *Waste as alternative fuel – Minimising emissions and effluents by advanced design*, Process Safety and Environmental Protection, 90, pág. 263–284

Hasar, H., Unsal, S., Ipek, U., Karatas, S., Cinar, O., Yman, C. e Kinaci, C. (2009), *Stripping/flocculation/membrane bioreactor/reverse osmosis treatment of municipal landfill leachate*, Journal of Hazardous Materials, 171, pág. 309-317

INE - Instituto Nacional de Estatística. Consultado em Fevereiro e Março de 2014, em <http://www.ine.pt/>

Kjeldsen, P., Barlaz, M., Rooker, A., Baun, A., Ledin, A. e Christensen, T. (2002), *Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate: A Review*, Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 32(4), pág. 297-336

Kulikowska, D. e Klimiuk, D. (2008), *The effect of landfill age on municipal leachate composition*, Bioresource Technology, 99, pág. 5981–5985

Lago, A. (2009), *Investigação 2D e 3D com aplicação em meio ambiente: estudo sobre uma área de disposição de resíduos de óleo lubrificante no município de Ribeirão Preto - SP*, Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas

Lago, A., Elis, V., Borges, W. e Penner, G. (2008), *Geophysical investigation using resistivity and GPR methods: a case study of a lubricant oil waste disposal area in the city of Ribeirão Preto, São Paulo, Brazil*, Environ Geol, Springer-Verlag

Laureano, A. (2007), *Estudos geofísicos no aterro sanitário de Cuiabá, MT*, Dissertação de Mestrado da Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Exatas e da Terra

Lino, F. e Ismail, K. (2011), *Energy and environmental potential of solid waste in Brazil*, Energy Policy, 39, pág. 3496–3502

Lunt, I., Hubbard, S. e Rubin, Y. (2005), *Soil moisture content estimation using ground penetrating radar reflection data*, Journal of Hydrology, 307, pág. 254–269

Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia (2013), *Proposta - PERSU 2020 - Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos*

Mota, R. (2014), *Avaliação das condições para produção de biogás no aterro do Barlavento da ALGAR, com base no método da resistividade elétrica*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Departamento de Geotecnia, Lisboa

Oliveira, J. (2009), *Caracterização da pluma de contaminação numa antiga lixeira com o método de resistividade elétrica*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa

Oliveira, M. (1986), *Avaliação de métodos de resistividade elétrica na deteção de cavidades*, Relatório de Estágio no Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Geotecnia, Núcleo de Prospeção

Rocha, R., Ramalho, E., Paralta, E. e Afonso, A. (2003), *Métodos geofísicos aplicados à prospeção de água subterrânea em rochas cristalinas do Alentejo: vantagens e limitações*, VI Congresso Nacional de Geologia, Monte de Caparica, 4 a 6 de Junho de 2003, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, CD-ROM, pág. D73-D76

Santos, F. (2005), *Aplicação de métodos geofísicos no estudo da contaminação de águas subterrâneas no lixão de Cuibá-MT*, Dissertação de Pós-Graduação, Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Exatas e da Terra

Scharff, H. e Jacobs, J. (2006), *Applying guidance for methane emission estimation for landfills*, Waste Management, 26, pág. 417–429

Silva, F. (2014), *Avaliação do Potencial da Produção de Energia Elétrica Através de Resíduos Urbanos em Portugal Continental - Horizonte Temporal 2014-2020*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa

Tchobanoglous, G., Theisen, H. e Vigil, S. (1993), *Integrated Solid Waste Management - Engineering Principles and Management Issues*, McGraw-Hill International Editions

Turesson, A. (2006), *Water content and porosity estimated from ground-penetrating radar and resistivity*, Journal of Applied Geophysics, 58, Pág. 99–111

Valle, P., Pintassilgo, P., Matias, A. e André, F. (2012), *Tourist attitudes towards an accommodation tax earmarked for environmental protection: A survey in the Algarve*, Tourism Management, 33, pág. 1408-1416

Williams, P. (2005), *Waste Treatment and Disposal* (2ªEd.), John Wiley & Sons, Ltd

Ziyang, L., Youcai, Z., Tao, Y., Yu, S., Huili, C., Nanwen, Z. e Renhua, H. (2009), *Natural attenuation and characterization of contaminants composition in landfill leachate under different disposing ages*, Science of the Total Environment, 407, pág. 3385–3391